



Tatiane Mayara Recrude

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de um processo para
correlacionar a performance do motor
CFM56-5B com as cordas das pás do
seu compressor de alta pressão**

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Engenheiro Mário Almeida Santos
Co-orientadores: Professor Doutor Luís Gil, Professor Auxiliar
Universidade Nova de Lisboa
Engenheiro António Miguel Henriques, Tap Air Portugal

**Desenvolvimento de um processo para correlacionar a performance do motor CFM56-5B
com as cordas das pás do compressor de alta pressão**

Copyright © 2018 Tatiane Mayara Recrude

Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais, Maria e José.

Agradecimentos

A presente tese foi resultado de um trabalho árduo e simboliza o final de um percurso repleto de aprendizagem e crescimento pessoal e profissional. Para a conclusão deste percurso contei com a ajuda de várias pessoas, todas igualmente importantes, por isso, deixo aqui o meu agradecimento.

Foi um privilégio ter sido orientada pelo Eng. Mário Almeida Santos. Queria expressar aqui o meu agradecimento por ter partilhado comigo os seus conhecimentos sobre a aviação e, obviamente, sobre os reatores, por ter as palavras certas nos momentos certos, pela sua motivação, por ensinar-me a ver que há várias formas de enfrentar o mesmo problema.

Agradeço ao Eng. Miguel Henriques por ter estado sempre presente no desenvolvimento deste trabalho, por fornecer todos os materiais, ferramentas e informações necessárias para a presente tese. Este agradecimento estende-se a todos os técnicos da TAP ME que me auxiliaram assim como os meus colegas de estágio e também ao Eng. António Ferreira por permitir a realização deste trabalho na TAP ME.

Queria também agradecer ao Professor Luís Gil por todo o seu apoio na escolha deste tema e por estar sempre disponível para esclarecer as minhas dúvidas e por tentar sempre encontrar soluções que poderiam ultrapassar a sua área de ensino.

Agradeço aos meus pais, Maria e José, pelo vosso amor e apoio incondicional, por permitirem que concluísse esta etapa da minha vida e por acreditarem sempre em mim. Obrigada por tudo!

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a minha avó Ida, por ter sido o pilar da minha vida. Acredito que, onde quer que estejas, estás a olhar por mim.

Resumo

O objetivo desta tese é propor um novo modo de otimizar o rendimento do compressor de alta pressão da família de reatores CFM56-5B e deste modo melhorar a *performance* desses reatores *versus* custo de reparação.

Para tal, é necessário obter conhecimentos sobre o funcionamento do compressor de alta pressão e dos seus componentes, sendo que o componente com maior influência no rendimento do compressor de alta pressão são as pás dos vários andares do compressor. Assim sendo, o objetivo é diminuir os custos associados à compra dessas pás e também definir um novo critério de aceitação dos valores da corda para cada andar do compressor de alta pressão de modo que, proporcione uma melhor *performance* do compressor de alta pressão e, naturalmente, do reator.

Ao desenvolver este estudo, foi necessário ter informações sobre a margem de EGT (parâmetro que indica a *performance* do reator), a pressão e temperatura à entrada e à saída do compressor de alta pressão e, por fim, valores de corda para cada andar do compressor de alta pressão em vários motores CFM56-5B, para realizar uma análise termodinâmica desta secção. Os valores de corda foram medidos manualmente e durante esta tese desenvolveu-se uma ferramenta de suporte para as pás de modo a facilitar a automatização deste processo; já os dados de pressão e temperatura foram fornecidos por sensores instalados na estrutura do reator, processados no Banco de Ensaio e analisados no *software* *Gasturb*. O *Gasturb* é uma ferramenta informática fundamental para a análise realizada nesta tese pois analisa a eficiência de cada componente do reator, termodinamicamente isolados.

Nesta tese foi possível desenvolver uma ferramenta física para as medições das cordas e definiu-se um novo critério de aceitação para melhorar a *performance* dos reatores CFM56-5B e reduzir os custos associados às pás do compressor de alta pressão.

Palavras-chave: *Performance* de reatores, compressor de alta pressão, cordas das pás do HPC, margem de EGT

Abstract

The aim of this thesis is to suggest a new approach to optimize the performance of the high pressure compressor of the CFM56-5B family of engines and in this way it is possible to improve the ratio of the performance of these engines and it's repair cost.

To do this, it is necessary to obtain knowledge about the operation of the high pressure compressor and its components, and taking in account that the component with the greatest influence on the performance of the high pressure compressor are the blades of the various stages of the compressor. Therefore, the objective is to reduce the costs associated with the purchase of these blades and also to define a new blade chord value criterion for each stage of the high pressure compressor so that it provides a good performance of the high pressure compressor and, of course, the engine, for a lower cost.

In developing this study, it was necessary to have information about the EGT margin (parameter that indicates the performance of the engine), the pressure and temperature at the inlet and outlet of the high pressure compressor, and finally the blade chord values for each stage of the high pressure compressor for various CFM56-5B engines in order to perform a thermodynamic analysis of this section. All the chord values were measured manually and during this thesis a support tool was developed for the blades in order to facilitate the automation of this process, since the pressure and temperature data are provided by sensors installed in the engine structure, processed in the Test Cell and analyzed in the Gasturb software. The Gasturb is a fundamental computational tool for the analysis performed in this thesis as it analyzes each engine component's efficiency thermodynamically isolated.

In this thesis it was possible to develop a physical tool for the measurements and a new blade chord acceptance criterion was defined to improve the performance of the CFM56-5B engines and reduce the costs associated with the high pressure compressor blades.

Keywords: Engine Performance, High Pressure Compressor, HPC Blades Chords, EGT Margin

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento do HPC | 1 |
| 1.2 Motivação | 4 |
| 1.3 Objetivos..... | 4 |
| 1.4 Estrutura da Dissertação | 5 |
| 2. Motor CFM56-5B..... | 7 |
| 2.1 Tipos de reatores..... | 7 |
| 2.2 Descrição do reator CFM56-5B..... | 11 |
| 2.2.1 Descrição do HPC | 13 |
| 2.3 Parâmetros de Performance | 16 |
| 2.3.1 Margem de EGT | 17 |
| 3. Banco de Ensaio | 21 |
| 3.1 TAP <i>Maintenance, Repair and Overhaul</i> (MRO) | 22 |
| 3.2 Banco de Ensaio da TAP | 23 |
| 4. Metodologia de Trabalho | 27 |
| 4.1 Medições manuais das cordas do HPC | 27 |
| 4.2 Medições automáticas das cordas do HPC | 30 |
| 4.3 Sensor PT25..... | 35 |
| 5. Análise de Performance..... | 39 |
| 5.1 Análise com o <i>GasTurb</i> | 39 |
| 5.2 Caso de Estudo | 43 |
| 6. Novo Critério de Aceitação | 51 |
| 6.1 Impacto de cada andar na performance do HPC..... | 51 |
| 6.2 Distribuição e Percentagem de Corda do HPC | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 7. Conclusões | 57 |
| 7.1 Conclusões..... | 57 |
| 7.2 Trabalhos Futuros | 58 |
| 8. Bibliografia | 59 |
| 9. Anexo A – Medições Realizadas..... | 61 |

Índice de Ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Exemplos de tipos de motores com turbina a gás [3]..... | 2 |
| Figura 1.2: Superfície danificada de uma pá do 1º andar do HPC | 3 |
| Figura 1.3: Processo de reparação de corda da pá do HPC por soldadura [4]..... | 3 |
| Figura 2.1: Relação eficiência e velocidade [5] | 8 |
| Figura 2.2: Comparação entre reatores e motores de explosão [5]..... | 9 |
| Figura 2.3: <i>Design</i> Modular do CFM56-5B [3] | 12 |
| Figura 2.4: Componentes do HPC [3]..... | 15 |
| Figura 2.5: Representação <i>Labyrinth Seals</i> [5] | 15 |
| Figura 2.6: Método de fixação, <i>locked blades</i> e <i>blade locks</i> [5] | 16 |
| Figura 2.7: Definição da Margem de EGT [6] | 17 |
| Figura 2.8: Ciclo de deterioração da margem de EGT [7] | 18 |
| Figura 2.9: Alterações na eficiência do compressor e na variação do clean heat rate devido ao processo de <i>fouling</i> [8] | 19 |
| Figura 2.10: Geometria dos <i>Labyrinth seals</i> [9]..... | 20 |
| Figura 3.1: Distribuição dos custos associados à manutenção [10]..... | 21 |
| Figura 3.2: Sala de controlo da TAP [11]..... | 23 |
| Figura 3.3: Interior do Banco de Ensaio da TAP ME [12]..... | 24 |
| Figura 3.4: Configuração do atual Banco de Ensaio da TAP ME..... | 25 |
| Figura 4.1: Ferramentas GO/NO GO | 28 |
| Figura 4.2: Dimensões ferramenta GO/NO GO [13] | 29 |
| Figura 4.3: Medição da corda com a ferramenta GO/NO GO..... | 29 |
| Figura 4.4: <i>Coordinate Measuring Machine</i> [14] | 31 |
| Figura 4.5: Impressora 3D utilizada para a realização das impressões de teste [15]..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6: Ponteira CMM [16]..... | 32 |
| Figura 4.7: <i>Stand</i> inicial com o perfil do 3º andar..... | 32 |
| Figura 4.8: Perfil do 3º andar do <i>stand</i> | 33 |
| Figura 4.9: Perfil para a base das pás do 4º andar | 34 |
| Figura 4.10: Perfil concluído para o 4º Andar..... | 34 |
| Figura 4.11: Funcionamento da CMM ao retirar os valores de corda das pás | 35 |
| Figura 4.12: Projeto inicial em <i>Solidworks</i> para o sensor PT25..... | 36 |
| Figura 4.13: Sensor PT25 do CFM56-3 | 37 |
| | |
| Figura 5.1: Característica de um HPC | 40 |
| Figura 5.2: Estações termodinâmicas do reator turbofan caracterizadas pelo <i>GasTurb</i> | 41 |
| Figura 5.3: Exemplo de um dos reatores analisados | 42 |
| Figura 5.4: Exemplo do MBTA de um reator | 43 |
| Figura 5.5: Resultado da análise do reator 1 recorrendo ao <i>Gasturb</i> | 45 |
| Figura 5.6: Resultado da análise do reator 2 recorrendo ao <i>Gasturb</i> | 45 |
| Figura 5.7: Iteração de T3 em regime <i>Take Off</i> | 48 |
| Figura 5.8: Iteração de T3 em regime <i>Maximum Continuous</i> | 49 |
| Figura 5.9: Influência do N2 no rendimento do HPC nos regimes <i>Maximum Continuous</i> e <i>Take Off</i> | 49 |
| | |
| Figura 6.1: Deterioração do HPC [19] | 52 |
| Figura 6.2: Zona comuns de falha por fadiga e pás do HPC danificadas [2] | 53 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1: Modelos CFM56 [3]..... | 10 |
| Tabela 2.2: Versões do modelo CFM56-5B [3] | 11 |
| | |
| Tabela 4.1: Valor de corda e número de pás por andar [3]..... | 28 |
| | |
| Tabela 5.1: Média e somatório das cordas de todos os andares do reator 1 | 44 |
| Tabela 5.2: Média e somatório das cordas de todos os andares do reator 2 | 44 |
| Tabela 5.3: Valores de corda mínimos definidos pelo manual e os novos obtidos pelas medições, assim como os somatórios de cada um..... | 44 |
| Tabela 5.4: Resultado do caudal para os dois reatores em relação à média da base de dados | 45 |
| Tabela 5.5: Tabela dos parâmetros lidos e as respectivas adimensionalização em relação à pressão e temperatura do reator 1 | 47 |
| Tabela 5.6: Valores da velocidade de rotação, N2, e da temperatura, T3, em regime <i>Take-Off</i> para os 5 reatores | 48 |
| Tabela 5.7: Valores da velocidade de rotação, N2, e da temperatura, T3, em regime Máximo Contínuo para os 5 reatores | 49 |
| | |
| Tabela 6.1: Somatório e ponderação de corda de cada andar de cada reator | 54 |
| Tabela 6.2: Percentagem de corda para cada andar em relação ao valor de corda de uma pá nova | 55 |
| | |
| Tabela 6.3: Resultados para o valor de corda para cada andar | 56 |
| Tabela 6.4: Valores de corda para pás novas e valores mínimos definidos pelo manual do fabricante [3] | 56 |

Abreviaturas

| | |
|--------------|--|
| BE | Banco de Ensaio |
| BPR | <i>Bypass Ratio</i> |
| CAMO | <i>Continuing Airworthiness Management</i> |
| CDP | <i>Compressor Discharge Pressure</i> |
| CFM | <i>Commercial Fan Moteur</i> |
| CMM | <i>Coordinate Measuring Machine</i> |
| DOA | <i>Design Organization Approvals</i> |
| EGT | <i>Exhaust Gas Temperature</i> |
| EGTM | <i>Exhaust Gas Temperature Margin</i> |
| HPC | <i>High Pressure Compressor</i> |
| HPT | <i>High Pressure Turbine</i> |
| HPTCC | <i>High Pressure Turbine Clearance Control</i> |
| IGV | <i>Inlet Guide Vanes</i> |
| LLP | Life Limited Parts |
| LPC | <i>Low Pressure Compressor</i> |
| LPT | <i>Low Pressure Turbine</i> |
| MBTA | <i>Model Based Test Analysis</i> |
| ME | <i>Maintenance and Engineering</i> |
| MRO | <i>Maintenance Repair and Overhaul</i> |
| NDT | <i>Non Destructive Testing</i> |
| OGV | <i>Outlet Guide Vanes</i> |
| TAP | Transportes Aéreos Portugueses |
| TSFC | <i>Thrust Specific Fuel Consumption</i> |
| VBA | <i>Visual Basic for Applications</i> |
| VBV | <i>Variable Bleed Valves</i> |

Nomenclatura

Símbolos Gregos

| | |
|------------|---|
| η | Eficiência |
| ρ | Densidade |
| Θ | Fator de correção da temperatura para <i>Standard Day</i> |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| α | Ângulo de ataque |
| δ | Coeficiente de Poisson |
| Υ | Taxa de capacidade de calor |
| Δ | Variação |

Símbolos Romanos

| | |
|----|-----------------------|
| P | Pressão |
| T | Temperatura |
| PR | <i>Pressure Ratio</i> |
| F | Força |
| N | Velocidade de rotação |
| M | Número de Mach |
| h | Altura da pá |
| H | Entalpia |
| c | Corda da pá |
| t | Grossura |
| PT | Pressão total |

Subscritos

| | |
|-------------|--|
| amb | Condições ambiente de pressão e temperatura |
| amb. DP | Condições dia padrão de pressão e temperatura |
| amb. ensaio | Condições ambiente de pressão e temperatura do dia de ensaio |
| stg | Andar |
| is | Isentrópico |
| corr | Valor corrigido |
| c | Compressor |
| min | Valor mínimo |
| max | Valor máximo |
| lido | Valor lido |
| s | Condições estáticas |
| LE | Leading edge |
| TE | Trailing edge |

1 Introdução

A indústria da aviação global produz cerca de 2% de CO₂ produzidos pelos humanos [1]. Tendo em consideração a dimensão e impacto da aviação no dia-a-dia, é um valor muito baixo. Esta realidade é consequência da necessidade de melhorar constantemente a *performance* dos reatores para conseguir cada vez mais baixos consumos de combustível. O compressor de alta pressão, que fornece de forma contínua ar altamente comprimido para a câmara de combustão, é um dos componentes que contribui para a estabilidade e segurança do reator na sua totalidade [2].

De entre todos os componentes do compressor de alta pressão as pás têm um papel fundamental, pois quanto maior a sua superfície, respeitando as dimensões do projeto, melhor será o seu desempenho. Então, quanto maior a corda maior a sua superfície. Assim sendo, a procura de pás do compressor de alta pressão com maior corda é um desafio, visto que as pás novas são as que apresentam superfícies maiores, mas com um custo elevado.

As pás podem ser novas, usadas ou reparadas por soldadura, ou seja, a corda da pá aumenta ao ser submetida a este processo. A pá nova apresenta um custo mais elevado, pois apresenta melhores propriedades assim como uma corda superior, as pás reparadas também têm um custo de reparação, sendo que a opção mais económica é a pá usada pois não tem custo pois é reaproveitada.

Com o propósito de melhorar a *performance* geral do reator é essencial fazer um estudo do mesmo para definir uma percentagem de valores de cordas das pás usadas e/ou reparadas que poderão constituir o reator de forma a reduzir os custos associadas à compra de pás novas.

1.1 Enquadramento do HPC

O compressor de alta pressão (HPC) em estudo na presente tese pertence à família das turbomáquinas mais utilizadas na aviação, turbinas a gás, que são caracterizadas pela presença de um fluido compressível e por extrair energia desse mesmo fluido, convertendo-o em potência. Estes motores têm a sua eficiência térmica representada no ciclo termodinâmico conhecido como ciclo de Brayton. Existem três tipos de reatores com turbina a gás distintos entre si: turbofan (ilustrado na figura 1.1c), turboprop (ilustrado na figura 1.1a) e turbojet (ilustrado na figura 1.1c), representados na figura 1.1. O motor em estudo é o turbofan, constituído por uma *fan*, um *booster*, ou seja, compressor de baixa pressão, um compressor de alta pressão (HPC), uma câmara de combustão, uma turbina de alta pressão (LPT), uma turbina de baixa pressão (LPT) e a tubeira de escape.

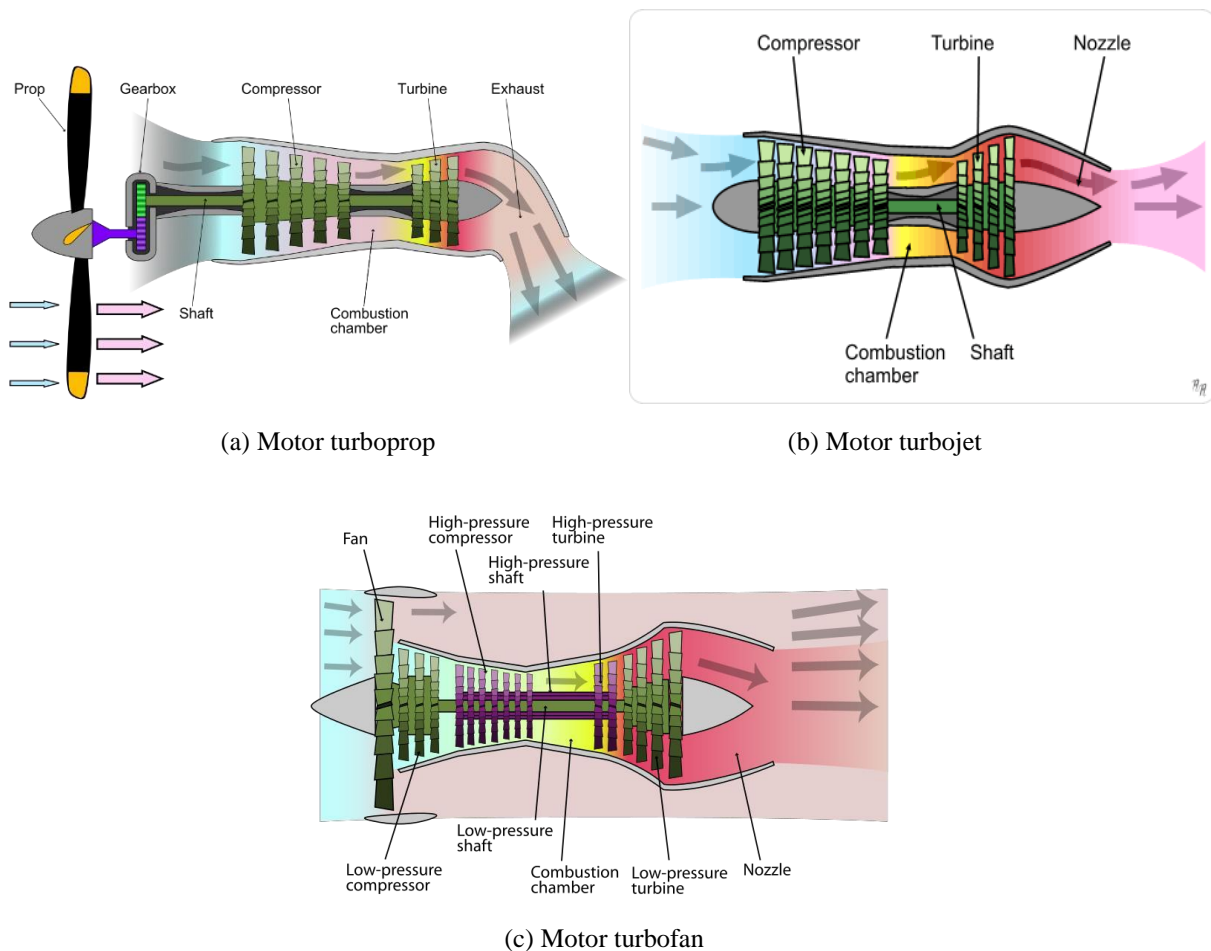


Figura 1.1: Exemplos de tipos de motores com turbina a gás [3]

O compressor de alta pressão é constituído por 9 andares, sendo que a corda das pás diminui, do primeiro para o último andar, de forma progressiva a medida que a pressão aumenta. As pás dos três primeiros andares do compressor de alta pressão apresentam superfícies maiores em relação aos outros andares e são constituídas por liga de titânio, pelo que não podem ser reparadas pelo processo de soldadura. As pás dos restantes andares são feitas de liga de níquel e as suas respectivas cordas são mais reduzidas quando comparadas com os 3 primeiros andares.

Com o acumular das horas de voos realizadas pelo motor a superfície das pás vai sendo reduzida por causa da erosão provocada no bordo de ataque pelas partículas e grão de areia em suspensão no ar.

Está representada na figura 1.2, uma pá que sofreu erosão do material como consequência dos materiais que entram no HPC como, por exemplo, grãos de areia. Como consequência destas erosões, as pás do 4 ao 9 andar podem ser reaproveitadas recorrendo a uma reparação onde a superfície em falta é preenchida por soldadura, representada na figura 1.3.



Figura 1.2: Superfície danificada de uma pá do 1º andar do HPC



Figura 1.3: Processo de reparação de corda da pá do HPC por soldadura [4]

Os fabricantes definem, nos manuais dos motores, valores mínimos de corda que conseguem garantir uma *performance* aceitável, de forma a ser possível reaproveitar pás usadas ou reparadas a um custo inferior. Porém, num motor em que as pás do compressor de alta pressão apresentam todas os valores mínimos especificados nos manuais, sua *performance* será muito baixa, ainda que aceitável.

O parâmetro mais importante da análise da *performance* do motor é a margem de EGT (*Exhaust Gases Temperature*). A definição da margem de EGT é a diferença entre o valor de EGT máximo que o motor pode aguentar em asa e o valor de EGT que é medido durante o ensaio do motor após reparação. Quando a margem de EGT diminui, o consumo de combustível aumenta, sendo assim, a margem de EGT apresenta um valor mais alto quando os motores são novos ou

após sofrerem uma restauração de *performance*, portanto quanto maior a deterioração do motor menor é a margem de EGT.

Então, recorrendo aos valores exatos de cordas medidos, aos resultados das eficiências de cada módulo do reator apresentados pelo *GasTurb*, *software* que permite analisar a *performance* de todos os componentes do reator, e dos resultados das margens de EGT de cada motor analisado, será possível definir um novo critério de aceitação entre pás novas, usadas e reparadas que poderão ser montadas no reator e que assegurem uma boa *performance* e um custo mais reduzido.

1.2 Motivação

A nível pessoal, o tema da presente dissertação é um desafio e é a concretização do objetivo em realizar um trabalho útil na área da aviação pois é uma área muito complexa, interessante e muito presente no nosso dia-a-dia. Para além disso, uma motivação essencial enquanto recente licenciada é a possibilidade de crescer a nível pessoal e profissional.

Do ponto de vista da empresa, TAP ME, a motivação é conseguir definir uma metodologia que possa contribuir para otimizar a *performance* dos reatores CFM56-5B após reparação, de uma forma segura, que minimize rejeições em Banco de Ensaio e reclamações de clientes.

1.3 Objetivos

A TAP ME deseja definir uma nova distribuição de pás e uma percentagem de corda para cada andar do compressor de alta pressão dos motores CFM56-5B que apresentem um bom compromisso entre o valor mínimo e máximo das respetivas cordas e que garanta uma boa margem de EGT em banco de ensaio, ou seja, margens de EGT mais elevadas possíveis em banco de ensaio.

De modo a reduzir os custos mantendo uma boa *performance* do motor, o desejável é conseguir utilizar pás usadas, desde que tenham um valor de corda superior ou igual ao valor mínimo definido pelo manual do fabricante pois não apresentam nenhum custo. Quando este cenário não é viável deve-se recorrer às pás reparadas que são mais económicas em relação às novas.

A forma de verificar os valores de corda de cada pá para analisar a sua influência na *performance* final do reator é a medição de cada pá.

Estas medições são realizadas manualmente utilizando uma ferramenta de medição fornecida pela fabricante, que apenas indica se a pá tem o valor de corda mínimo aceitável ou não. O objetivo é ter o valor exato de corda, assim sendo, recorreu-se também ao paquímetro para obter esse valor final para, posteriormente, ser analisado.

Para reduzir os possíveis erros presentes na medição, a TAP ME irá encomendar um sensor PT25 que, inicialmente, deveria ser desenvolvido durante o meu estágio, mas verificámos que o sensor existente no motor CFM56-3 encaixa no motor CFM56-5B. O sensor irá fornecer valor de pressão total à entrada do compressor de alta pressão.

A TAP ME possui uma CMM (*Coordinate Measuring Machine*). Esta máquina é fundamental pois consegue ser programada para que a sua ponteira faça a medição e o armazenamento de todas as cordas submetidas neste processo.

Recorrendo à esta máquina e à ajuda de um técnico especialista, a TAP ME tem como objetivo desenvolver um stand onde poderão ser encaixadas, de forma a que estejam fixas, as pás de cada andar. Assim, a máquina realiza as medições das cordas de forma automática e rápida, com a duração de apenas alguns minutos.

1.4 Estrutura da Dissertação

A constituição e funcionamento do motor CFM56-5B é apresentada no capítulo 2, assim como a análise mais profunda do funcionamento e da eficiência perante o impacto do caudal e do rendimento do HPC. Além disso, são também caracterizado os parâmetros de *performance* e a margem de EGT.

No capítulo 3 é feita uma descrição do método utilizado nas medições das cordas das pás do HPC e projeto, desenvolvimento e dificuldades de um método automático para realizar essas medições.

No capítulo 4 demonstra-se a análise realizada com os dados do banco de ensaio utilizando o *software GasTurb*, os conceitos da Termodinâmica e os resultados alcançados nessa análise.

Depois desta análise é possível definir um novo critério de aceitação de percentagem de corda das pás do HPC que está caracterizada no capítulo 5, assim como os resultados obtidos como consequência deste novo critério.

A seguir, no capítulo 6, apresenta-se as conclusões obtidas durante o estudo desta Dissertação em relação as possíveis reduções de custos associados as compras de pás novas, resultado final do *stand* para realizar as medições automáticas e caracterização do processo de

concepção, idealização e produção da mesma e por fim os resultados sobre a eficiência do compressor e *performance* do reator com o novo critério.

Para finalizar, no capítulo 7, é apresentado o material de estudo utilizado para a obter os conhecimentos necessários para elaborar e desenvolver esta tese.

2 Motor CFM56-5B

A propulsão a jato é uma aplicação prática da Terceira Lei de Newton, conhecida como Princípio da Ação e Reação, que afirma que para toda a força que atua sobre um corpo, há uma reação oposta e igual. Para a propulsão da aeronave, o ‘corpo’ é o ar atmosférico que é acelerado ao passar pela tubeira convergente/divergente de escape produzindo a força de impulso para o avião se deslocar. Durante a passagem do ar pelo reator, mudanças de pressão e velocidade são fundamentais para a aerodinâmica da aeronave.

A ação do compressor é aumentar a pressão e a temperatura e não a velocidade, pois com objetivo de melhorar a eficiência da combustão o que é importante é ter um fluxo de ar comprimido o mais não perturbado possível. Este processo é realizado pela tubeira convergente na qual o compressor está inserido o compressor, seguida da tubeira divergente no fim da qual está a câmara de combustão e que reduz a velocidade do escoamento do ar para nela entrar o menos perturbado possível. Na zona das câmaras de combustão a secção é constante, pois aqui o ar é aquecido pela combustão. À saída da câmara de combustão o gás é caracterizado pela sua elevada temperatura e assim, a sua energia interna também é superior. Deste modo, é necessário aumentar a velocidade destes gases para fazer girar a turbina, sendo que esta elevada velocidade dos gases também é fundamental para, ao passar pela tubeira de escape, produzir o impulso que propulsa a aeronave. Esta tubeira apresenta características convergente/divergente.

A força gerada ao se fazer esta aceleração tem um efeito igual e na direção oposta, aplicada na aeronave, produzindo a propulsão da aeronave.

2.1 Tipos de reatores

Um reator de propulsão a jato tem como objetivo acelerar um fluxo de ar ou gás e expulsá-lo a alta velocidade. O impulso pode ser alcançado ao fornecer à uma grande massa de ar um pouco mais de velocidade ou uma pequena massa de ar uma grande velocidade.

As soluções atuais são (figura 2.1):

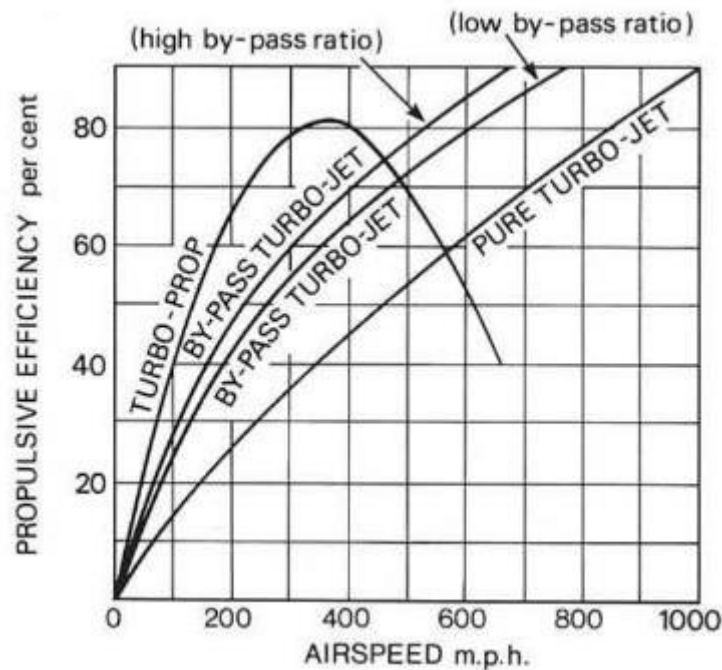


Figura 2.1: Relação eficiência e velocidade [5]

É possível verificar que o reator turbo-prop atinge rapidamente a sua eficiência ao acelerar uma maior quantidade de ar, porém a velocidade de rotação das hélices é limitada pela velocidade do som que pode ocorrer nas pontas das mesmas, o que pode levar a uma perda de eficiência.

O ciclo de funcionamento do reator pode ser comparado ao de um motor de explosão embora não ocorra da mesma forma; a semelhança consiste em que o reator funciona também com 4 tempos: Admissão de ar, compressão, combustão e escape dos gases. É possível observar este exemplo na figura 2.2:

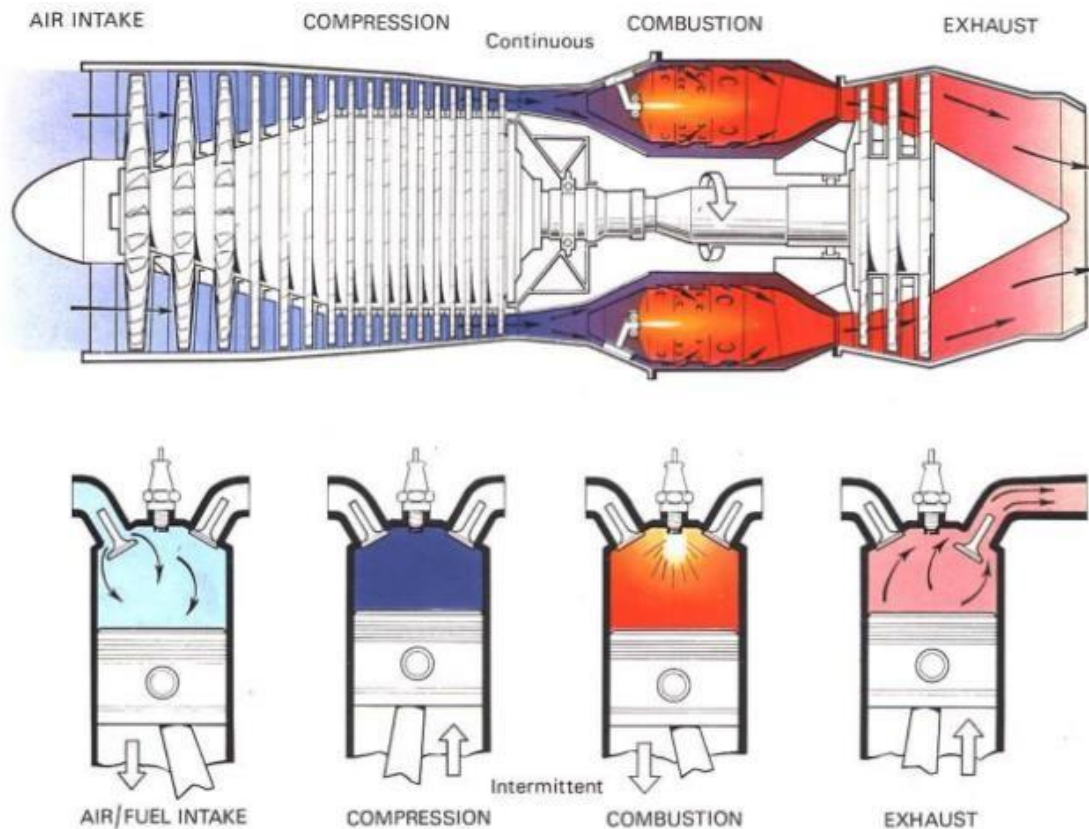


Figura 2.2: Comparação entre reatores e motores de explosão [5]

A área da *fan* tem um forte impacto na eficiência do reator, pois quanto maior a sua área maior é a admissão de ar. No entanto, apenas uma parte desse ar é direcionada para o núcleo do reator, passando pelo compressor, câmara de combustão e turbina. Em relação ao reator em estudo 4/5 do fluxo de ar passa pela *fan*, ou seja, não cumpre o último ciclo descrito: compressor, câmara de combustão e turbina.

Esta grande parte do ar é desviado para um caminho, chamado *bypass*, que passa à volta do núcleo e é direcionado para a saída do reator. Este fluxo de ar pode ser responsável por até 85% da potência de um reator Turbofan. O fluxo de ar que passa pelo núcleo do reator é responsável por ativar a turbina, que por sua vez ativa o compressor e a *fan*.

Para o restante fluxo (1/5) o ciclo percorrido pelo mesmo é caracterizado por passar pela *fan*, sendo que é direcionado para o compressor de baixa pressão e, posteriormente, para o compressor de alta pressão. Ao passar pelas pás do compressor, a pressão do ar aumenta. O objetivo do compressor é comprimir o ar tanto quanto possível, assim, o seu volume diminui, a temperatura aumenta o que melhora a eficiência da combustão.

Na câmara de combustão, o ar comprimido é misturado com o combustível, a temperatura pode chegar aos 2000°C. O resultado desta combustão aumenta o volume da massa de ar e como

a câmara de combustão não expande, a massa de ar escoia pela turbina a uma alta velocidade que a turbina se encarrega de converter em energia rotativa.

À saída os gases resultantes da combustão misturam-se com o ar proveniente do *bypass*.

2.2 Descrição do reator CFM56-5B

Os reatores em estudo pertencem à CFM *International* que é líder no mercado de produção de reatores e representa o resultado de um empreendimento em conjunto entre dois grandes fabricantes de reatores, sendo eles a Snecma de França, mais conhecida como Safran Aircraft Engine e a GE, General Electric dos Estados Unidos da América. A GE é responsável pela produção do compressor de alta pressão, câmara de combustão e a turbina de alta pressão, por outro lado, a Safran fabrica a fan, a caixa de acessórios, tubeira de gases de escape e a turbina de baixa pressão.

O nome CFM56 é baseado na união entre a designação das famílias dos reatores comerciais de cada empresa, CF6 da GE e M56 da Snecma.

Os modelos CFM56 separam-se em 4 variantes representadas na tabela 2.1:

Tabela 2.1: Modelos CFM56 [3]

| Modelo | Thrust (lbf) | BPR | Aplicações |
|---------|-----------------|-----------|-------------------------|
| CFM56-2 | 22,000 - 24,000 | 6 | Douglas DC-8-70 |
| CFM56-3 | 20,000 - 23,500 | 5.9 - 6.0 | Boeing 737 |
| CFM56-5 | 22,000 - 34,000 | 5.4 - 6.6 | Airbus A319, A320, A321 |
| CFM56-7 | 18,500 - 27,300 | 5.1 - 5.6 | Boeing 737 |

Os reatores CFM56 são definidos pelo *seu high-bypass ratio*, que por definição é designado como taxa de diluição (BPR), esta relação é feita entre o fluxo de massa de ar *bypass*, massa de ar que entra no reator, mas não sofre combustão, e o fluxo de massa de ar que entra no interior do reator e sofre combustão. No reator CFM56-5 da tabela acima, podemos concluir que o BPR de 5.4 significa que por cada parte de ar que entra no compressor de baixa pressão, 5.4 partes de ar só passam pela *fan*.

Do fluxo total de ar que passa pela *fan*, 80% é responsável pela propulsão produzida através do fluxo de ar secundário e os restantes 20% seguirá para o interior do reator, realizando a sua compressão e combustão.

Tabela 2.2: Versões do modelo CFM56-5B [3]

| Modelo | Thrust (lbf) | Bypass ratio | Relação de pressão | Aplicações |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|---------------------|
| CFM56-5B1 | 30,000 (130 kN) | 5.5 | 35.4 | Airbus A321 |
| CFM56-5B2 | 31,000 (140 kN) | 5.5 | 35.4 | Airbus A321 |
| CFM56-5B3 | 33,000 (150 kN) | 5.4 | 35.5 | Airbus A321 |
| CFM56-5B4 | 27,000 (120 kN) | 5.7 | 32.6 | Airbus A320 |
| CFM56-5B5 | 22,000 (98 kN) | 6.0 | 32.6 | Airbus A319 |
| CFM56-5B6 | 23,500 (100 kN) | 5.9 | 32.6 | Airbus A319, A320 |
| CFM56-5B7 | 27,000 (120 kN) | 5.7 | 35.5 | Airbus A319, A319CJ |
| CFM56-5B8 | 21,600 (96 kN) | 6.0 | 32.6 | Airbus A318 |
| CFM56-5B9 | 23,300 (100 kN) | 5.9 | 32.6 | Airbus A318 |

Os motores da família CFM56-5B apresentam várias versões, como representado na tabela 2.2. Dentro destas versões o modelo em estudo é o CFM56-5B3 que exibe uma BPR de 5.4 e aproximadamente 33.000 lbf (150 kN).

Todos os motores aeronáuticos são muito interessantes e complexos. Para simplificar o estudo e a descrição do funcionamento dos seus elementos, a sua composição será descrita com base nos seus 4 principais módulos:

- *Fan Major Module*
- *Core Major Module*
- *LPT Major Module*
- *Accessory Drive Module*

Na figura 2.3 está ilustrado um reator CFM56-5B, para o melhor entendimento e localização dos módulos referidos.

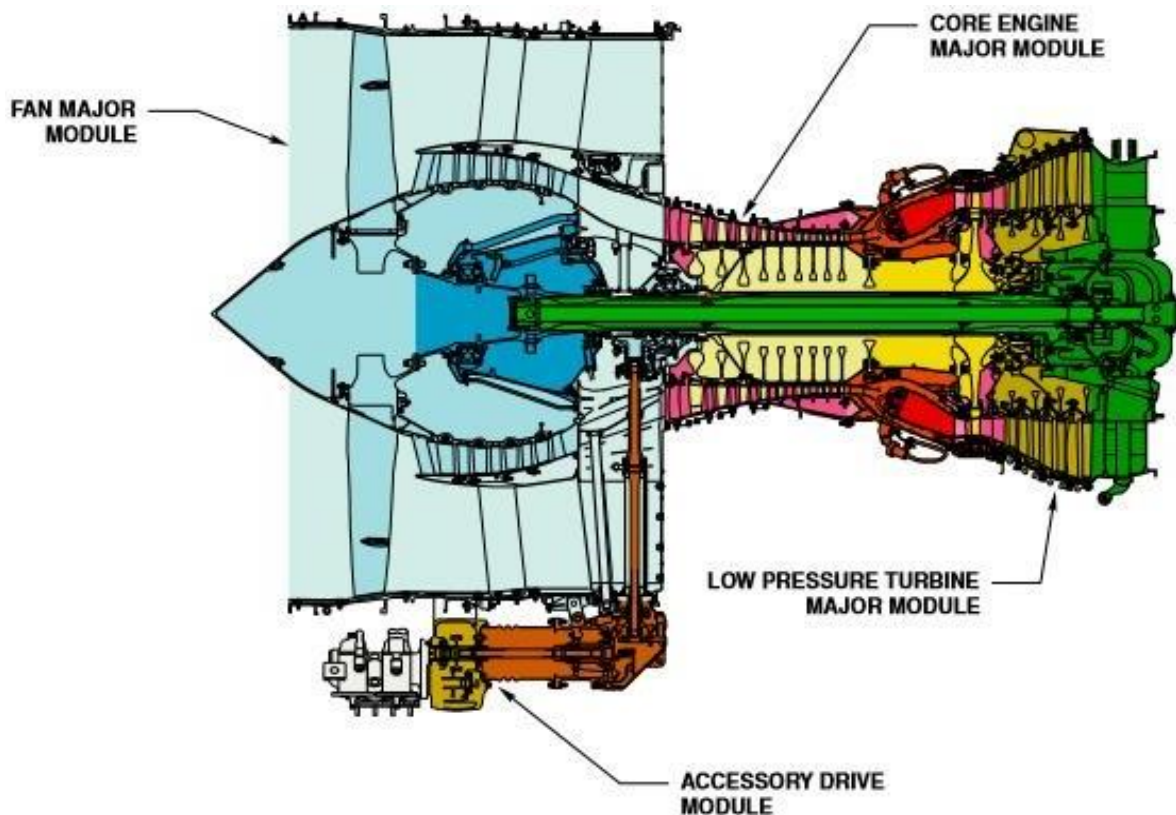


Figura 2.3: Design Modular do CFM56-5B [3]

O Fan Major Module pertence à secção de baixa pressão do reator e é constituído por:

- *Fan*: rotor com apenas 1 andar composto por 36 pás de uma liga de titânio (Ti – 6Al/4V), zona de admissão do ar para o reator;
- Um *booster* axial: compressor de baixa pressão, nesta secção o ar é comprimido antes a baixa pressão;
- *Fan frame*: estrutura que suporta a fan, o booster e os rolamentos dos eixos do LPC;
- *Outlet Guide Vanes*: perfis aerodinâmicos desenhados para eliminar a componente tangencial da velocidade do ar na descarga da fan, ou seja, orienta o escoamento de forma axial de modo a otimizar a eficiência do reator.
- *Variable Bleed Valves (VBV)*: Estas válvulas controlam o fluxo do ar primário em regimes de velocidades baixas, com a função de evitar *stall* do compressor abrindo durante desaceleração rápida do motor, descarregando o excesso de ar para o fluxo secundário. Estão localizadas na fan frame entre o *Booster* e o HPC.

O módulo em estudo é o *Core Major Module*, secção de alta pressão do reator, constituído por:

- Compressor de alta pressão (HPC), constituído por 9 andares de rotor e estator, comprime o ar a alta pressão
- *Inlet guide vane* (IGV) de 1 andar que orienta o ar primário para o HPC;
- Câmara de combustão, onde o ar comprimido é misturado com o combustível e ocorre a combustão;
- Turbina de alta pressão composta por 1 andar, transição do ar altamente comprimido para uma pressão mais baixa.

O *LPT Major Module* pertence à secção de baixa pressão do reator, constituído por:

- LPT composto por 4 andares, tem como objetivo diminuir a pressão do ar e orientá-lo para a tubeira de escape;
- *Turbine rear frame*, que suporta a LPT e os rolamentos dos eixos da mesma.

Como o reator é composto por estas duas secções distintas, secções de baixa e de alta pressão, os veios do compressor e turbina de alta pressão, estão acoplados entre si, assim como os veios do compressor e turbina de baixa estão acoplados entre si.

Ambos os veios rodam a velocidades de rotação distintas. A velocidade de rotação mais baixa N1 está, naturalmente, associada ao sistema de baixa pressão, por outro lado, o veio que corresponde à velocidade de rotação mais elevada N2, pertence ao sistema de alta pressão.

Em relação às dimensões do reator, tem-se um peso de 2,391kg e um comprimento de 2,94m.

2.2.1 Descrição do HPC

Nas turbinas a gás, a compressão do ar antes da expansão através da turbina é realizada por um compressor, que pode ser axial ou centrífugo. Neste caso, o compressor é axial. O compressor axial é um componente, constituído por vários andares alternados de pás rotativas e pás estacionárias, que aceleram e orientam o ar de modo a atingir a pressão desejada [4], antes deste entrar na câmara de combustão.

O HPC do CFM56 é constituído por 9 andares, conforme representado na figura 2.2. Nos 3 primeiros as pás não podem ser reparadas pois são feitas de uma liga de titânio. Nos restantes andares, as pás são feitas com uma liga de níquel e podem ser reparadas. As dimensões das pás vão se reduzindo porque o ar vai sendo comprimido, assim, as cordas (e o resto das dimensões) vão sendo cada vez menores.

O primeiro andar é composto por 38 pás, o segundo por 53, o terceiro por 60, o quarto por 68, o quinto por 75, o sexto por 82, o sétimo por 82, o oitavo por 80 e o nono por 76.

O rotor do compressor de alta pressão (HPC) é accionado pelo rotor da HPT e gira à velocidade N2, aproximadamente 14600 rpm durante o *Take-Off*.

O HPC também é composto por peças fundamentais e críticas para a segurança da aeronave. As peças de vida limitada (*Life Limited Parts*) são, por definição, componentes para os quais são especificados limites de substituição obrigatória. Estes limites são definidos nos manuais do fabricante ou pelas instruções da Aeronavegabilidade Contínua, que designa estes componentes como *Airworthiness Limitation Items*.

São componentes críticos pois são submetidos a solicitações ou tensões pulsatórias de tracção, desde modo, em caso de falha pode por em causa a integridade estrutural do reator e, assim, interferir com a aeronavegabilidade da aeronave, ou seja, com a sua segurança. Estas solicitações ou tensões são, normalmente, definidas pelo número de ciclos de operação aos quais as LLPs são submetidas.

Um ciclo de operação define-se como um voo que consiste na aceleração para decolagem, decolagem em si e aterragem. Há outras situações que podem ser consideradas como um ciclo como, por exemplo, uma aterragem “touch and go” ou abortada é considerado um ciclo de operação. O limite para a troca mandatória dos componentes é, aproximadamente, 20.000 ciclos de operação.

Estão identificadas na figura 2.4, os 5 componentes de vida limitada que constituem o HPC:

- *HPC Front Shaft*
- *Stages 1-2*
- *Stage 3*
- *Stages 4-9*
- *CDP Air Seal*

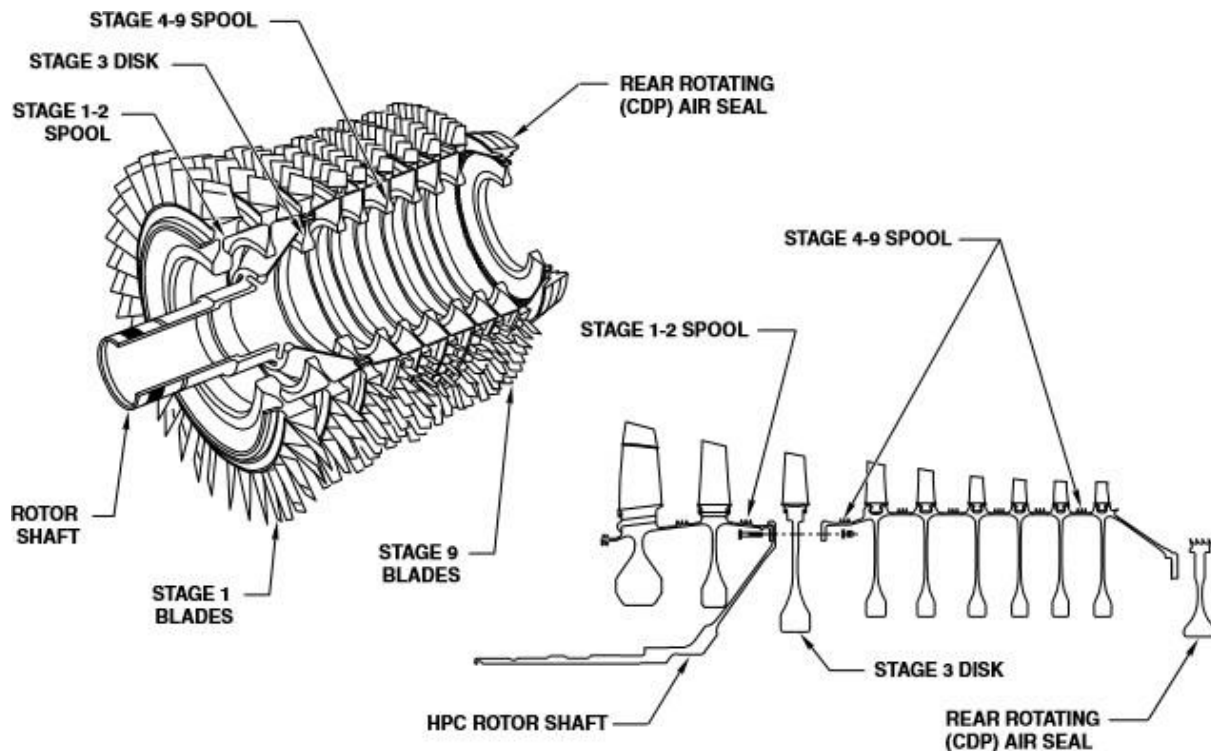


Figura 2.4: Componentes do HPC [3]

A transmissão do torque é realizada através de uma ligação aparafusada entre o HPT *Front Shaft* e o CDP *Air Seal*.

As pás dos 3 primeiros andares são encaixadas no HPC axialmente. Do 4º ao 9º andar as pás são encaixadas circunferencialmente. Entre os andares existem *labyrinth seals* que são maquinadas no *spool*, estrutura onde são encaixadas as pás. O *labyrinth seal*, representado na figura 2.3, tem a função de impedir que haja fuga de ar, mas não fecha completamente a passagem.

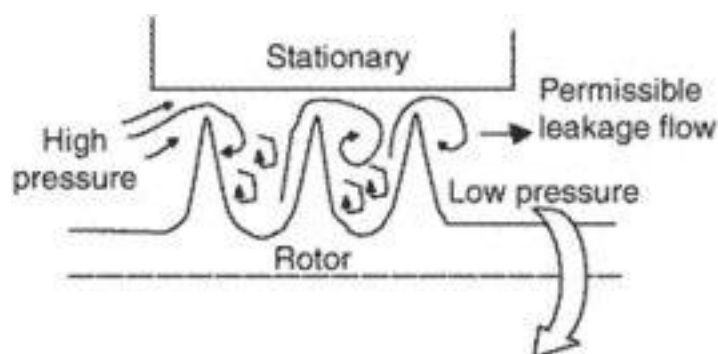


Figura 2.5: Representação *Labyrinth Seals* [5]

Nos andares do 4º ao 9º existem 4 pás por andar, designadas por *locked blades* que deverão garantir a fixação de todas as pás no respectivo andar, com a ajuda das *blade locks* (peça que faz a ligação de fixação entre as pás e o *Spool*). Deste modo, todo o andar fica fixo, ou seja, sem folgas entre as pás e sem as possíveis pequenas oscilações das respectivas pás.

Na figura 2.4 está representada este método de fixação.

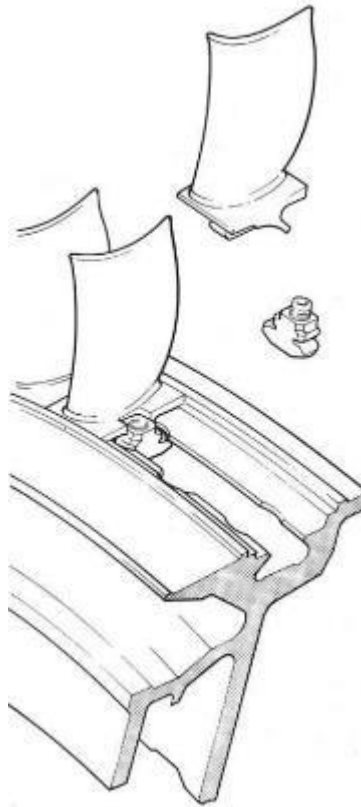


Figura 2.6: Método de fixação, *locked blades* e *blade locks* [5]

2.3 Parâmetros de Performance

Os parâmetros de *performance* conseguem indicar a eficiência do reator. Os parâmetros que podem ser analisados é o impulso do reator, a margem de EGT, o valor do EGT e o consumo de combustível específico,

Todos estes valores são obtidos através dos ensaios realizados nas instalações da TAP ME.

Para a análise da *performance* dos reatores, o parâmetro mais importante é a margem de EGT e é baseado neste parâmetro que será realizado o estudo da presente tese.

2.3.1 Margem de EGT

A temperatura dos gases à saída da turbina ou temperatura dos gases de escape, EGT, é medida e lida por vários sensores instalados no carter de escape, cujo sinal é processado pelo equipamento do Banco de Ensaio e afixado num dos seus écrans.

A margem de EGT é a diferença entre o pico do valor de EGT medido no banco de ensaio em regime *take-off*, onde a potência é máxima e é também a situação mais crítica do motor, e o valor do EGT máximo possível em *take-off* definido pelo fabricante, ou seja, o valor do EGT *red line*, como representado na figura 4. O valor do *red line* define qual é a temperatura máxima que o motor aguenta em asa, ou seja, abaixo desse valor todos os materiais aguentam sem sofrer nenhum dano em regime de impulso máximo.

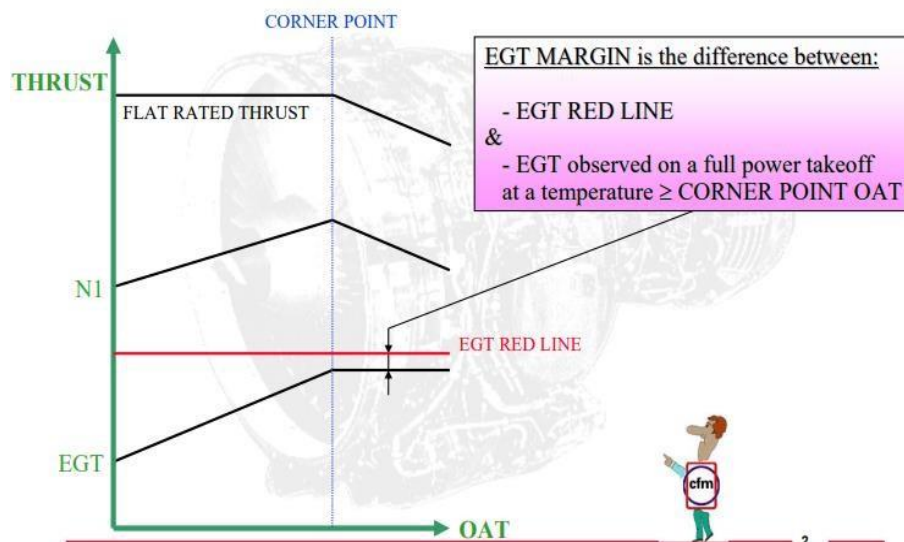


Figura 2.7: Definição da Margem de EGT [6]

As margens de EGT apresentam valores mais altos, quando os reatores são novos ou quando são submetidos a uma restauração de *performance*, pois quanto maior for a deterioração do reator menor será a margem de EGT, ou seja, estará mais próximo do valor limite de EGT que o reator aguenta em asa, conforme apresentada na figura 2.7.

Na realidade, o *thrust* e o N1 são proporcionais entre si. Sendo que, na figura 2.5, o *Flat Rated Thrust*, quando o reator é sempre capaz de dar o mesmo *thrust*, deveria ser apenas *Rated thrust*, ou seja, deveria o *thrust* deveria aumentar conforme a temperatura do ar exterior (OAT) como está representado o N1.

Ao atingir o *corner point*, temperatura limite que o material do reator aguenta sem pôr em causa a integridade e eficiência do mesmo sem atingir o *EGT Red Line*.

Em adição, há vários fenômenos que podem influenciar a deterioração da margem de EGT. Na figura 2.6 está representado um ciclo de deterioração da margem de EGT, provocadas por situações que ocorrem no HPC.

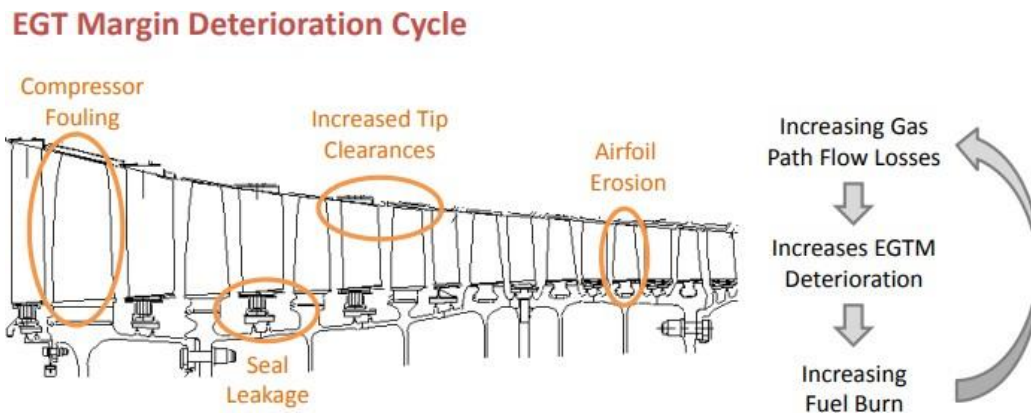


Figura 2.8: Ciclo de deterioração da margem de EGT [7]

Na figura 2.8 pode-se verificar os 4 fenômenos que podem ter impacto na eficiência do HPC: *Compressor fouling*, *seal leakage*, *increased tip clearances* e *airfoil erosion*.

Os reatores a turbina a gás são suscetíveis ao *compressor fouling*, que está associado à formação e acréscimo de camada de impurezas e partículas nas pás do compressor. Com o aumento da pressão e temperatura ao longo do compressor, torna-se mais difícil remover estas impurezas. A figura 2.9 abaixo representa o desenvolvimento da eficiência do compressor, tendo em conta o efeito do *compressor fouling*:

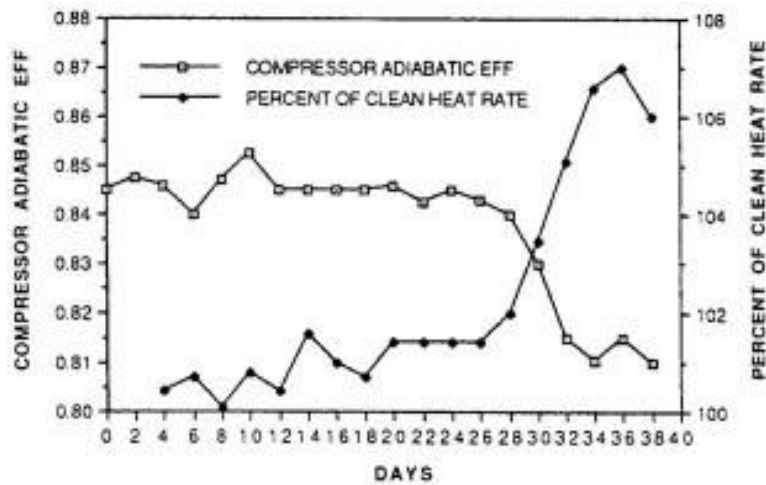


Figura 2.9: Alterações na eficiência do compressor e na variação do clean heat rate devido ao processo de *fouling* [8]

Para minimizar este efeito deve-se recorrer à lavagem do compressor. A lavagem utilizada na aviação tem o nome de *Off-line Washing*, que consiste em:

- Manter o compressor limpo por um longo período
- Estende o período de operação da aeronave
- Não é necessário parar as operações de voo
- Não é produzida água efluente
- Manutenção segura
- Reduz o risco de corrosão das pás do HPC

O efeito *labyrinth seals*, vedações sem contacto que consiste em uma série de cavidades ligadas entre si por pequenas folgas, tem como objetivo minimizar o escoamento do ar entre a zona estacionária para a rotativa. Têm a vantagem de suportar altas temperaturas e variações de pressão.

Segundo a análise de Tong e Kyu [8] sobre a influência no escoamento a partir das configurações dos *labyrinth seals* (figura 2.10), concluiu-se que entre as 2 configurações possíveis (*stepped* e *straight*) a *stepped* não é viável porque só é vantajosa quando as folgas são grandes, o que significa ter menos dentes, pois para além de ser mais difícil na configuração *stepped*, as folgas devem ser maiores. Assim sendo, o ideal é a configuração *straight* ao permitir acomodar mais dentes.

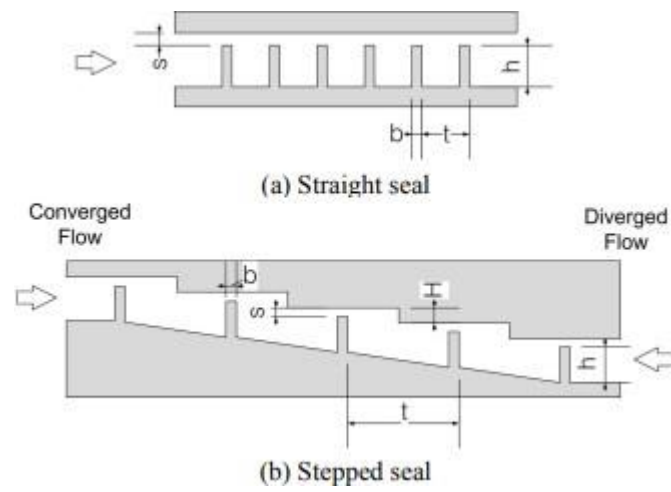


Figura 2.10: Geometria dos *Labirynth seals* [9]

Na presente tese o estudo é focado no *compressor fouling and airfoil erosion*. Que consiste no estudo do impacto do desgaste das cordas das pás do compressor de alta pressão.

3 Banco de Ensaio

No contexto da aviação a segurança é maior prioridade. Para confirmar o seu bom funcionamento, após uma intervenção em oficina, os reatores são submetidos a ensaios que possam mostrar a boa condição dos seus vários componentes bem como a sua *performance*.

Os custos associados à manutenção na aviação habitualmente são distribuídos entre (conforme a figura 3.1):

- Fuselagem
- Componentes
- Reator

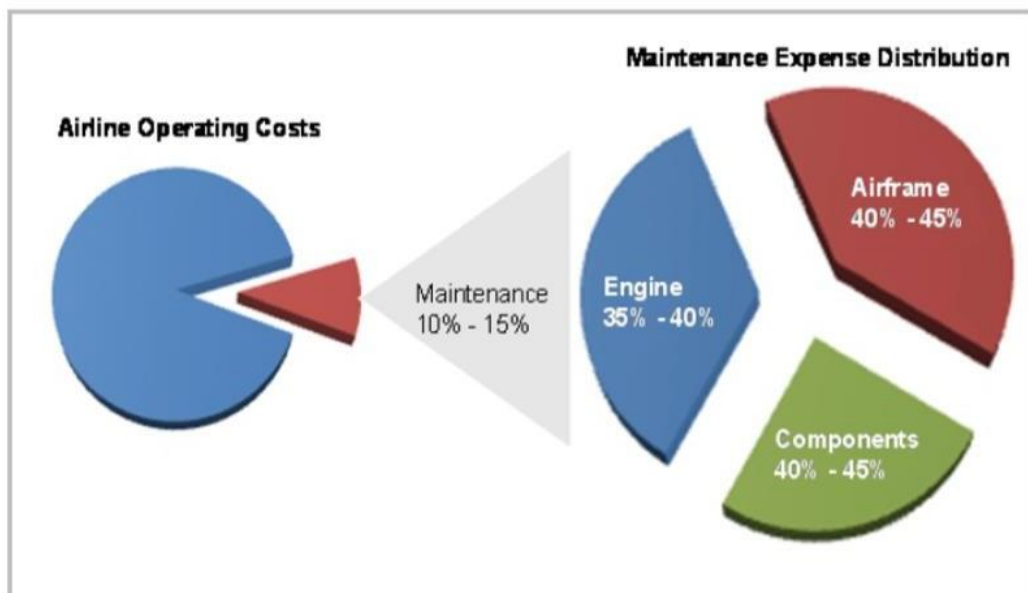


Figura 3.1: Distribuição dos custos associados à manutenção [10]

Sem avarias, quanto mais horas voadas, mais baixo será o custo por hora de voo, mesmo se o custo da reparação ser ligeiramente mais elevada pelo facto de o motor ter voado mais tempo.

Existem 4 tipos de manutenção distintas a que o reator poderá ser submetido:

Uma é a "restauração da *performance*"; para esta situação são inspecionados os componentes com perfil aerodinâmico (pás e vanes dos Compressores e Turbinas) que sofrem erosão e são submetidos a temperaturas mais elevadas, apresentando problemas de fluência. Esses componentes são aproveitados ou substituídos por novos ou reparados conforme o estado em que se encontrarem, com o intuito de melhorar a *performance* do reator, normalmente indicada através da margem de EGT. A inspecção e eventual substituição das pás do compressor de alta pressão

(que são os principais componentes em estudo nesta tese) enquadra-se neste tipo de manutenção, pois aqui o intuito é verificar o seu impacto na *performance* do reator.

A segunda é a “substituição de peças de vida limitada”, que são peças que estão fortemente solicitadas e que, por isso, sofrem de fadiga (discos e veios). Assim que estas peças atingem o seu limite de vida à fadiga, têm que ser substituídas por novas e nunca mais podem voltar a ser utilizadas.

A terceira tem como objectivo a reparação das avarias que podem ocorrer nos diferentes sistemas do reator, como por exemplo: Lubrificação (roturas de tubos, acumulação de carvão nos rolamentos, etc.), Controlo dos Compressores (Vanes Variáveis – VSV e Válvulas de Purga Variáveis – VBV), Peças estruturais – Carters (fracturas e desgastes) e não estruturais - Câmaras de Combustão (fracturas, queimaduras e deformações), etc.

A última, mas não menos importante, é para cumprimento de Directivas de Navegabilidade (Airworthiness Directives) emitidas pelas Autoridades de Segurança Aeronáutica (EASA e FAA), que normalmente implicam Inspecções e Modificações (Service Bulletins) urgentes, se algum dos componentes ou peças do reator evidenciar problemas no funcionamento que possam colocar em risco a segurança de voo.

3.1 TAP *Maintenance, Repair and Overhaul* (MRO)

As alterações necessárias feitas no reator têm de cumprir as exigências definidas pelo cliente em contrato com a TAP.

Uma das prioridades do contrato é obter um valor igual ou superior ao estabelecido, entre o cliente e a TAP, em relação à Margem de EGT (EGTM). Para atingir a margem de EGT definida, são feitas alterações a nível de reparação e manutenção, como por exemplo, trocar as pás de um andar do HPC por pás novas. A análise no Banco de Ensaio (BE) é o último processo a que o reator é submetido para verificar a sua *performance*, baseando-se no resultado da margem de EGT.

Durante o ensaio são analisados 2 aspetos importantes de operação do reator. Em primeiro lugar é examinada a integridade mecânica do reator. Inclui possíveis fugas hidráulicas, parafusos soltos e os níveis das vibrações. Em segundo, é examinado a *performance* estática e dinâmica do reator. Inclui a análise dos valores obtidos para a temperatura, pressões, caudal entre outros para comparar com os parâmetros de *performance* aceitáveis.

Depois de serem analisados todos os seus parâmetros, o reator poderá apresentar-se como pronto para ser instalado na aeronave ou se não alcançar os resultados pretendidos, deverá ser

identificada a origem da anomalia em causa, e depois o reator deverá ser submetido a um novo processo de reparação para garantir os parâmetros desejados.

3.2 Banco de Ensaio da TAP

As variações não uniformes de temperatura, pressão e a existência de vórtices ou turbulências exteriores ao reator, existentes no Banco de Ensaio, podem alterar os resultados de *performance* do mesmo. Perante a estas possibilidades é fundamental que a configuração do banco de ensaio forneça a melhor estabilidade possível de modo a minimizar a existência dessas situações críticas para a *performance*.

O Banco de Ensaio da TAP encontra-se ao nível do mar e é interior. A instalação tem um canal de entrada e outro de saída, uma sala de controlo (representada na figura 3.2) e uma área para a preparação do reator.



Figura 3.2: Sala de controlo da TAP [11]

Na figura 3.3 está representado o espaço onde o reator é instalado para a realização do ensaio.



Figura 3.3: Interior do Banco de Ensaio da TAP ME [12]

Inicialmente o Banco de Ensaio da TAP apresentava uma configuração em “L”, ou seja, a admissão do ar é feita na horizontal e os gases de escape escoam no segmento vertical.

Uma grelha estava instalada na secção horizontal, na admissão do ar, para que fosse feito um alisamento do fluxo do ar de modo a evitar turbulências à entrada do reator e contribuir também para a redução de ruído. Para além disso, a configuração do BE em “L” é a mais simples e é a que apresenta custos de construção mais baixos.

Normalmente, esta configuração, fornece uma boa distribuição do fluxo de ar, porém é sensível a alterações relativamente às condições do vento podendo, por exemplo, provocar uma perda de eficiência com a mudança do vento. Para a melhor *performance* possível é necessário ter uma área de admissão do Banco de Ensaio relativamente larga e sem obstrução.

No entanto, o Banco de Ensaio da TAP ME sofreu alterações em 1989 ou 1990, quando se adaptou o mesmo para o teste do reator CF6-80C2, passando assim a ter a configuração em “U”.

Na figura 3.4 é apresentada uma ilustração que pretende demonstrar, de forma clara, a geometria e a disposição do atual Banco de Ensaio da TAP ME.

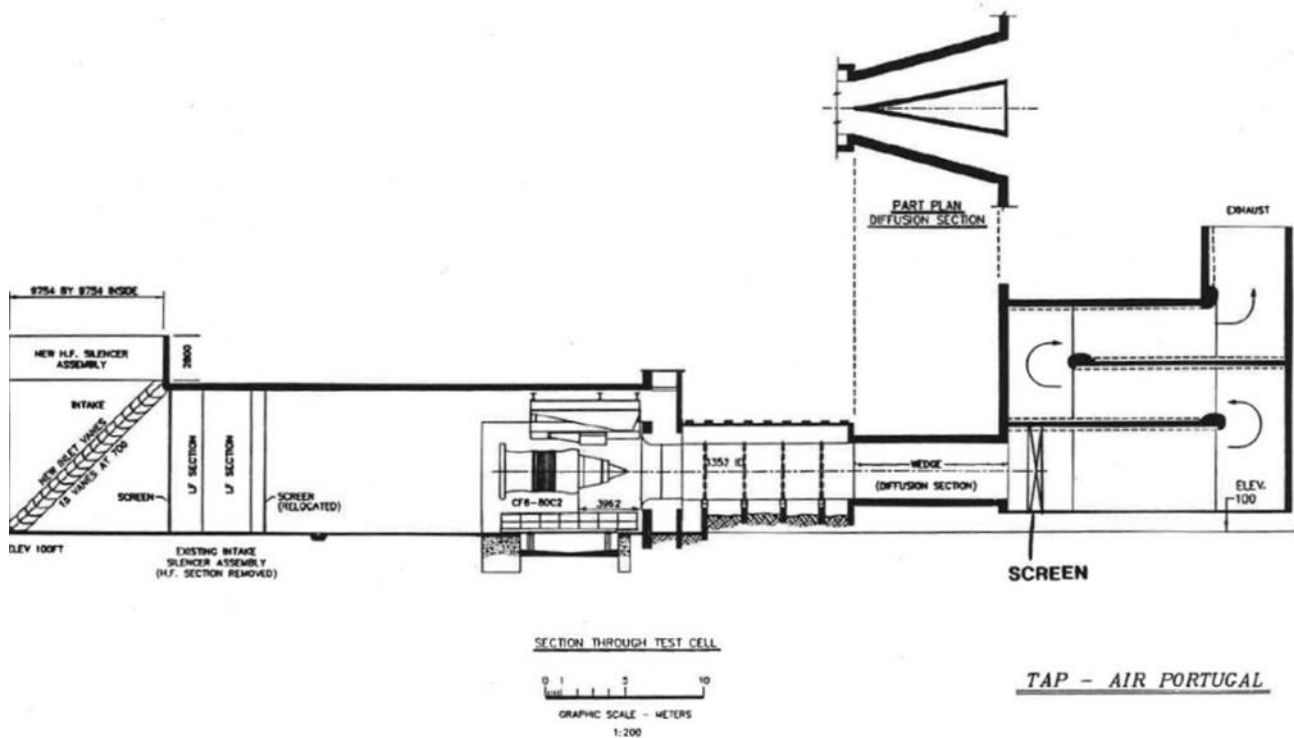


Figura 3.4: Configuração do atual Banco de Ensaio da TAP ME

A modificação, projetada pela GE, teve como objetivo principal receber reatores com maior potência como por exemplo o CF6, reduzir o ruído que, apesar de ser controlado na sua antiga configuração, poderia ser minimizado devido à localização citadina do aeroporto e por fim, monitorizar o controlo digital da aeronave através de um sistema caracterizado por um computador, conhecido como unidade de controlo do reator (ECU), mais os seus acessórios que, no seu conjunto, constituem o FADEC, *Full Authority Digital Engine Control*. A função do FADEC é garantir que o reator trabalhe com a eficiência máxima em determinadas situações.

Outra motivação para realizar esta modificação, foi um melhor aproveitamento do espaço exterior disponível. A entrada de ar passou de horizontal para vertical, nesta nova configuração, e foi acrescentada uma sala de preparação do banco de ensaio, a sala de brasagem e os fornos para os tratamentos térmicos.

4 Metodologia de Trabalho

Como um processo fundamental para o desenvolvimento da presente tese, a metodologia de trabalho inicia-se com a descrição das medições manuais das cordas das pás do HPC (as medições do presente estudo foram realizadas desta forma) porém com a necessidade de otimizar este processo realizou-se um projeto para obter resultados de medições de forma automática. Por fim, é descrito o desenvolvimento do sensor PT25. Com os dados dos valores de corda obtidos através das medições e com a instalação do sensor PT25 recorre-se a uma análise estatística, realiza-se o ensaio do reator obtendo leituras do EGT e por fim, pode-se calcular a margem de EGT e a eficiência do reator.

As medições são essenciais para o desenvolvimento deste estudo. Só é possível alcançar resultados e obter conclusões após a realização de medições das cordas das pás do HPC de vários motores, pois só assim é possível verificar a Porém, este processo fica dependente da quantidade de motores que passam pela oficina da TAP e que são desmontados. Depende também da urgência em montar os motores, conforme essa urgência não é possível realizar as medições.

Neste capítulo é descrito os processos de medições (manual e automatizada) das cordas das pás do compressor de alta pressão. As medições foram feitas manualmente e para medir todas as cordas das pás de um HPC é necessário uma manhã e uma tarde o que caracteriza este processo como lento e moroso. Sendo assim, um dos objetivos deste estudo é desenvolver uma ferramenta que suporte as pás de modo que, em conjunto com a *Coordinate Measure Machine* (CMM) disponível na TAP ME, os valores das cordas das pás são obtidos de forma automática, mais rápida e precisa.

Neste capítulo, é exposta a importância do sensor PT25, que fornece o valor de pressão à entrada do compressor de alta pressão. O resultado registado pelo sensor PT25, em conjunto com os valores da corda das pás, é essencial para verificar as condições de funcionamento do compressor de alta pressão.

Com estas metodologias de trabalho é possível, após o ensaio e com as leituras de EGT, realizar a análise da eficiência do HPC e, como consequência, do reator.

4.1 Medições manuais das cordas do HPC

Para realizar as medições manualmente é necessário recorrer à ferramenta de medição de corda GO/NO GO, representada na figura 4.1(a). Existe uma ferramenta GO/NO GO para cada

andar do HPC, indicadas na figura 4.1(b), porque cada andar tem um valor mínimo de corda distinto e as dimensões das pás também variam de andar para andar.

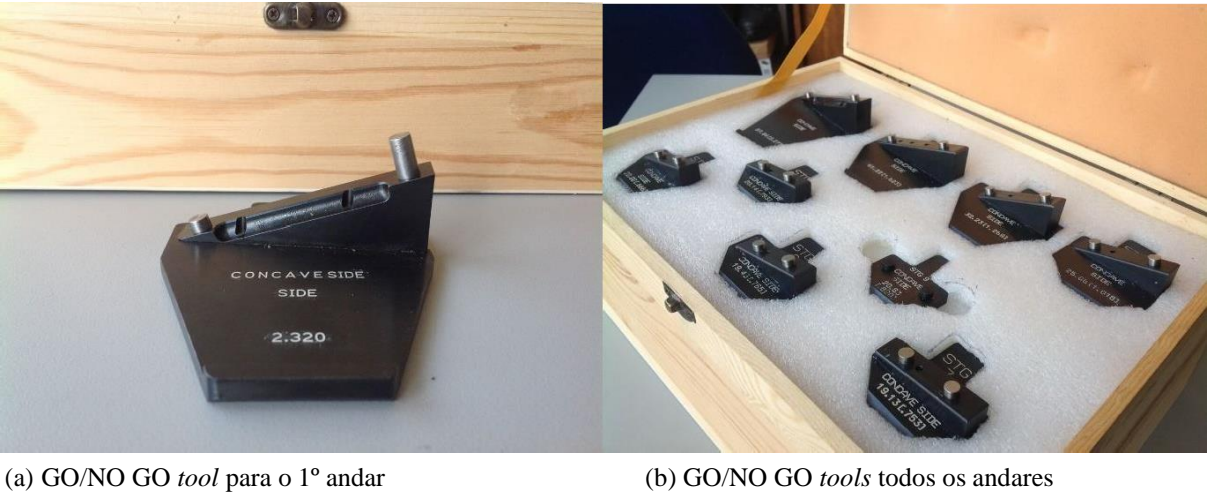


Figura 4.1: Ferramentas GO/NO GO

Na tabela 4.1 é apresentado o valor de corda mínimo de cada andar do HPC, o valor de corda de uma pá nova e o número de pás de cada andar do HPC. Estes valores são indicados em polegadas.

Tabela 4.1: Valor de corda e número de pás por andar [3]

| | Mínimo (in) | Pás Novas (in) | Nº de pás |
|----------------|-------------|----------------|-----------|
| <i>Stage 1</i> | 2,277 | 2,375 | 38 |
| <i>Stage 2</i> | 1,617 | 1,658 | 53 |
| <i>Stage 3</i> | 1,267 | 1,312 | 60 |
| <i>Stage 4</i> | 1,021 | 1,08 | 68 |
| <i>Stage 5</i> | 0,871 | 0,905 | 75 |
| <i>Stage 6</i> | 0,765 | 0,798 | 82 |
| <i>Stage 7</i> | 0,757 | 0,774 | 82 |
| <i>Stage 8</i> | 0,8 | 0,816 | 80 |
| <i>Stage 9</i> | 0,82 | 0,863 | 76 |

As pás desejadas apresentam um valor de corda superior aos valores mínimos definidos pelos manuais do fabricante. Os pinos da ferramenta GO/NO GO definem o valor da corda do respetivo andar, utilizando a ferramenta GO/NO GO, a pá pode ter 3 classificações diferentes.

A figura 4.2 exemplifica as dimensões que são utilizadas como uma referência para a classificação das pás do HPC.

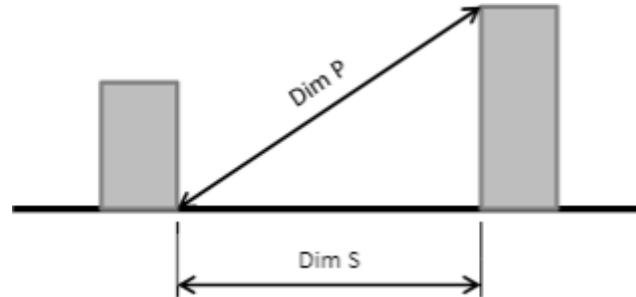


Figura 4.2: Dimensões ferramenta GO/NO GO [13]

Classificação:

- $\text{Corda} \geq \text{Dim P}$ = Classe A (situação desejada);
- $\text{Dim S} < \text{Corda} < \text{Dim P}$ = Aceitável;
- $\text{Corda} < \text{Dim S}$ = Sucata.

Para um melhor entendimento da utilização desta ferramenta, o processo de medição recorrendo a ela está representado na figura 4.3:

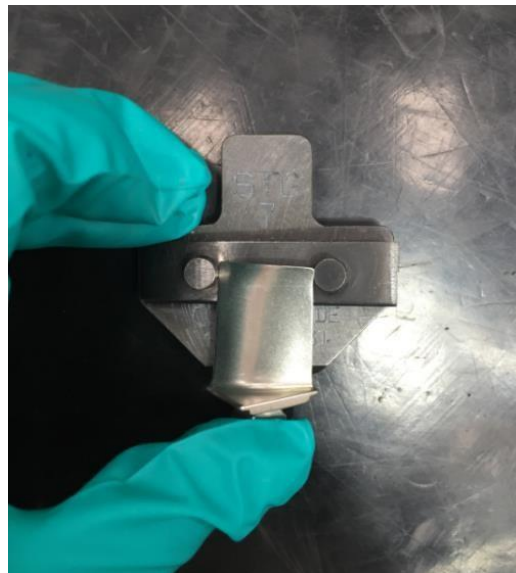


Figura 4.3: Medição da corda com a ferramenta GO/NO GO

Para obter resultados precisos sobre o impacto das dimensões da corda de cada andar do HPC na *performance* do motor, estas medições foram complementadas com as medições da corda utilizando um paquímetro.

Este processo, realizou-se da seguinte forma:

1. Utilizando a ferramenta GO/NO GO marca-se, com uma caneta própria para esta finalidade, os pontos de contacto entre os pinos e a pá.
2. Com o paquímetro obtém-se o valor, em polegadas (*inch*), da corda.

Este processo repete-se para todas as pás de todos os andares do HPC e os valores são guardados num ficheiro para serem analisados posteriormente.

4.2 Medições automáticas das cordas do HPC

Durante o processo de medições das cordas das pás do HPC tornou-se claro que as medições manuais das cordas das pás do HPC não poderiam ser realizadas, no futuro, de forma contínua na TAP. O processo é muito lento e seria necessário disponibilizar mais de um técnico para otimizar o processo das medições e o tempo investido em tal.

Assim sendo, surgiu a necessidade de desenvolver um processo onde as medições pudessem ser realizadas de forma automática, num período de tempo de minutos. Ao tornar-se um processo automatizado, os valores de corda obtido e registados, são mais precisos pois, neste caso, não tem interferência humana. Por estes motivos, é um projeto muito interessante em que pode ser utilizado para armazenar os dados dos valores das cordas das pás dos vários reatores, para futuras análises que poderão ser solicitadas pelos clientes e também para futuros estudos.

A melhor solução concebida foi desenvolver uma ferramenta, ou seja, um stand onde deverá ser possível encaixar de forma fixa todas as pás dos vários andares do HPC de um reator. Esta ferramenta, por sua vez, será apoiada e imobilizada na mesa de apoio existente na máquina *Coordinate Measuring Machine* (CMM), representada na figura 4.4.

A ponteira da máquina CMM, poderá tocar em 3 pontos da corda da pá, por exemplo, e posteriormente medir, registrar e analisar esses valores segundo os novos critérios de aceitação propostos na presente tese.



Figura 4.4: *Coordinate Measuring Machine* [14]

As dimensões das bases das pás do HPC são fundamentais para o desenvolvimento da ferramenta utilizada para as medições automáticas e esses dados não existem. Assim sendo, as dimensões das bases das pás do HPC foram retiradas com um paquímetro e realizou-se vários testes recorrendo à impressora 3D, figura 4.5, para obter um perfil mais aproximado da base da pá. Entre impressões, verificou-se que é possível realizar um perfil com cotas mais reduzidas e assim as pás ficam completamente imóveis.

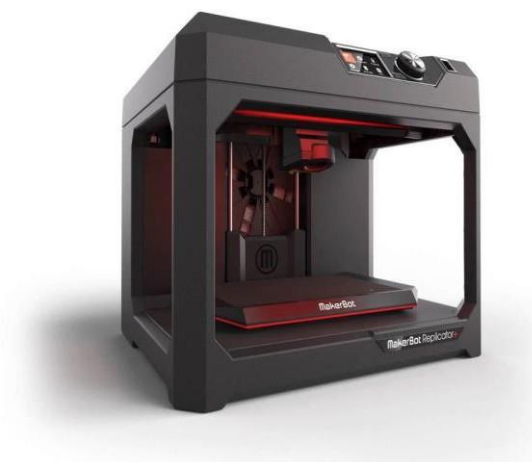


Figura 4.5: Impressora 3D utilizada para a realização das impressões de teste [15]

Porém, o maior desafio foi conceber uma ferramenta que encaixasse as pás de modo que, quando a ponteira da máquina CMM, representadas na figura 4.6, entrasse em contacto com a pá, esta não oscilasse, pois sabe-se que estas oscilações, por mais pequenas que sejam, são suficientes para alterar os valores da corda das pás.



Figura 4.6: Ponteira CMM [16]

No decorrer do estudo para desenvolver este processo, as ideias e propostas iniciais alteraram-se. A conceção inicial era realizar um *stand* similar a uma mesa, que ocupasse toda a superfície de apoio da máquina CMM disponível, representada na figura 4.7.

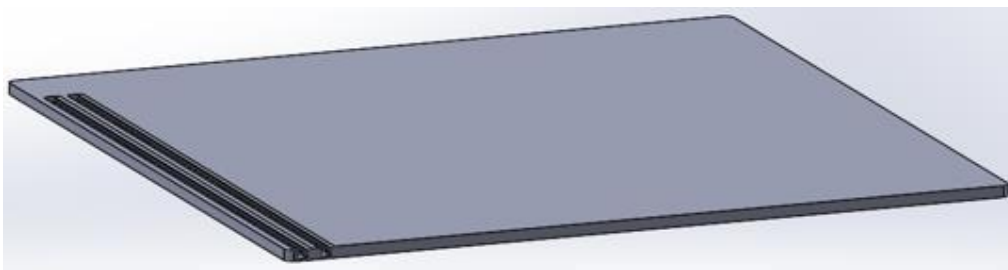


Figura 4.7: *Stand* inicial com o perfil do 3º andar

Na figura 4.8 apresenta-se o perfil do 3º andar amplificado, representado na imagem anterior:

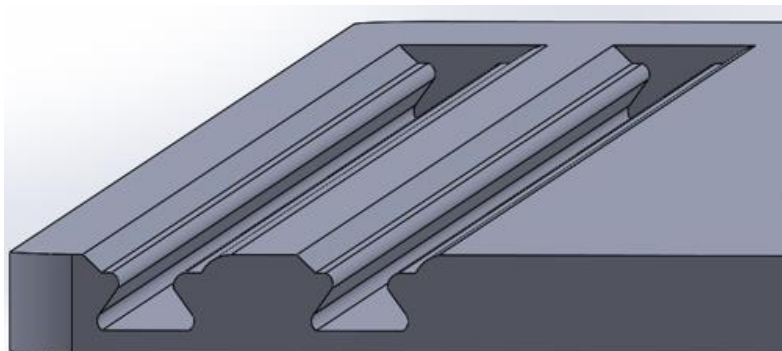


Figura 4.8: Perfil do 3º andar do *stand*

Ao analisar a concepção inicial, surgiu um obstáculo: a impossibilidade de fixar todas as pás de todos os andares de um reator no mesmo stand, pois a quantidade de pás aumenta com o número de andares do HPC, e para tal seria necessário criar um stand com grandes dimensões que ultrapassariam o espaço disponível na máquina CMM. Além disso, a geometria da base das pás do primeiro andar tem uma grande dimensão e apresentam uma geometria mais complexa em relação às outras, assim sendo, seria necessário criar um perfil ou stand apenas para este andar.

Ao rever a concepção inicial e os seus obstáculos, concluiu-se que seria mais prático realizar um perfil para cada andar do HPC.

Esta nova sugestão torna mais simples a realização das ferramentas em *Solidworks* e a sua utilização acaba por ser mais eficaz pois, normalmente, os andares do HPC não estão completos ao mesmo tempo. Isto acontece porque, normalmente, alguns andares podem ficar mais tempo na inspeção dimensional enquanto outros já estão prontos para integrarem o HPC, ou então, a TAP necessita comprar pás novas ou reparadas e, assim, o reator apresenta andares incompletos enquanto essas pás não chegam à oficina e, entretanto, os outros andares já deverão estar completos.

Para desenvolver os perfis individuais, continuou a recorrer-se à utilização da impressora 3D para realizar os testes para otimizar as dimensões e folgas dos mesmos. A primeira tentativa realizada com sucesso foi com o perfil do 4º andar, representado na figura 4.9. Para teste, imprime-se um perfil muito reduzido, pois o objetivo é obter uma ferramenta com pouca folga de modo a imobilizar a pá verticalmente.

Para além do teste para a pá do 4º andar, foi possível realizar este teste para uma pá de quase todos os andares, recorrendo aos mesmos processos.



Figura 4.9: Perfil para a base das pás do 4º andar

Assim sendo, durante o período de estágio na TAP ME, foi possível concluir o projeto para o 4º andar do HPC. O perfil foi feito em *Solidworks* e com a ajuda dos técnicos da TAPME Maquinação e Ferramentas ficou concluída a ferramenta, representada na figura 4.10.



Figura 4.10: Perfil concluído para o 4º Andar

Na figura abaixo, 4.11, está representado o perfil apoiado e encaixado na mesa da *Coordinate Measuring Machine* e a sua ponteira.



Figura 4.11: Funcionamento da CMM ao retirar os valores de corda das pás

O projeto para o 4º andar pode ser realizado da mesma forma para os 5º, 6º, 7º, 8º e 9º andares, pois o perfil é o mesmo, altera-se apenas as dimensões. Em relação aos 3 primeiros andares, essencialmente o primeiro andar (as pás apresentam uma geometria mais complexa e têm maiores dimensões), é preciso realizar o projeto de outra forma.

Idealmente, este projeto seria executado utilizando uma máquina *Scanner*. Recorrendo a esta máquina o desenvolvimento da ferramenta é simplificado porque, neste caso, não há contacto entre a pá e a máquina. Assim sendo, basta a pá estar encaixada, até pode existir alguma folga, desde que se mantenha na posição vertical.

4.3 Sensor PT25

Uma das propostas de trabalho a realizar no estudo da presente Dissertação era

desenvolver um sensor de pressão que deveria ser instalado à entrada do compressor de alta pressão. O reator vem preparado para receber esse sensor, pois o fabricante utiliza este acessório para fazer os testes necessários para verificar o funcionamento do reator antes de entregar ao cliente. Isto significa que é possível encaixá-lo de forma simples, pois a estrutura tem uma abertura para este sensor. Contudo, sempre que o reator se encontra em condições para ir para o banco de ensaio é necessário instalar este sensor e depois do ensaio tem de ser retirado. Esta instalação e desinstalação do sensor PT25 é um processo delicado porque é feito manualmente e há riscos de danificar a estrutura e caso não seja bem executada, pode causar danos no reator durante o ensaio.

Para tal, tomou-se como exemplo os sensores existentes na TAP de outros reatores, como por exemplo o CFM56-3, e assim começou-se a desenvolver um protótipo semelhante utilizando o *Solidworks*, representado na figura 4.12.

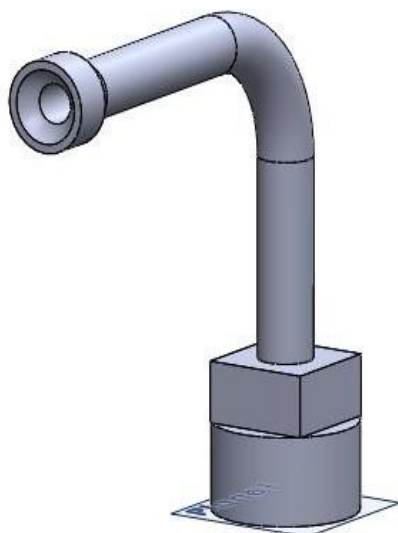


Figura 4.12: Projeto inicial em *Solidworks* para o sensor PT25

Porém, no decorrer deste projeto foram realizadas várias visitas à oficina da TAP ME com o objetivo de verificar as dimensões da abertura na estrutura do HPC. Utilizou-se um sensor do CFM56-3, representado na figura 4.13, para tentar encaixar e ter uma noção mais aproximada das dimensões e foi possível encaixá-lo perfeitamente, sem interferir com a estrutura nem com o HPC em si.



Figura 4.13: Sensor PT25 do CFM56-3

Assim sendo, este projeto ficou concluído com a decisão de utilizar o sensor PT25 já existente. Logo, foi uma mais valia para a evolução da presente tese, visto que, já não seria necessário investir tempo na idealização e concepção desta ferramenta.

Para além disso, nos ensaios que se seguiram já poderia ser instalado o sensor PT25 que contribui para isolar termodinamicamente o HPC, fornecendo dados de pressão à entrada do HPC de cada reator, que são fundamentais para a análise a ser realizada neste estudo.

5 Análise de Performance

Neste capítulo é feita uma breve descrição do *software Gasturb*, ferramenta informática utilizada para a análise de *performance* dos componentes do reator. É descrito as etapas e como é feita esta análise e é apresentado também os conceitos da Termodinâmica utilizadas pelo *GasTurb* para realizar a análise de *performance* dos mesmos componentes.

É incluído neste capítulo um caso de estudo. Durante o desenvolvimento da presente tese, surgiu uma situação em que o cliente pretendia obter garantias sobre a eficiência do HPC pois o reator apresentou resultados de EGT muito abaixo do esperado, após ter sido submetido a restauração dos componentes do reator. Como os valores das cordas desse reator foram armazenados, durante o processo de medição, tornou-se um estudo interessante para incluir na presente tese e útil para apresentar respostas aos clientes.

5.1 Análise com o *GasTurb*

O *software* de simulação de desempenho de turbinas a gás avançado está a tornar-se cada vez mais importante em estudos de projeto, análise de ciclo de vida, previsão de desempenho e diagnósticos [17].

Em relação à TAP, o interesse demonstrado pelo *software Gasturb*, desenvolvido pelo Dr. Joachim Kurzke, que regista 28 anos de experiência na simulação de *performance* de reatores na empresa MTU Aero Engines, está no auxílio que pode proporcionar à equipa de engenharia para a previsão dos efeitos a nível de *performance* de uma determinada reparação, economizando custos, tempo e recursos oficina. É também um *software* interessante e adequado para o ensino em academias e universidades, pois é formatado para analisar cada componente ou módulo do reator de forma isolada, ou seja, é possível analisar estes componentes isolados termodinamicamente.

De acordo com o trabalho de V.A. Pachidis [17], o *software* de simulação dos ciclos dos motores aeronáuticos consiste em representações adimensionais individuais da *performance* dos seus componentes (mapas) obtidas por via experimental, com ajustes empíricos para os efeitos *Off-Design*, tal como a geometria variável e a correção das folgas. Estes mapas ou característica, apresentam a relação entre o caudal, razão de pressão, rendimento e velocidade de rotação para toda a gama de funcionamento de um determinado componente. Na figura 5.1 está representado a característica de um HPC.

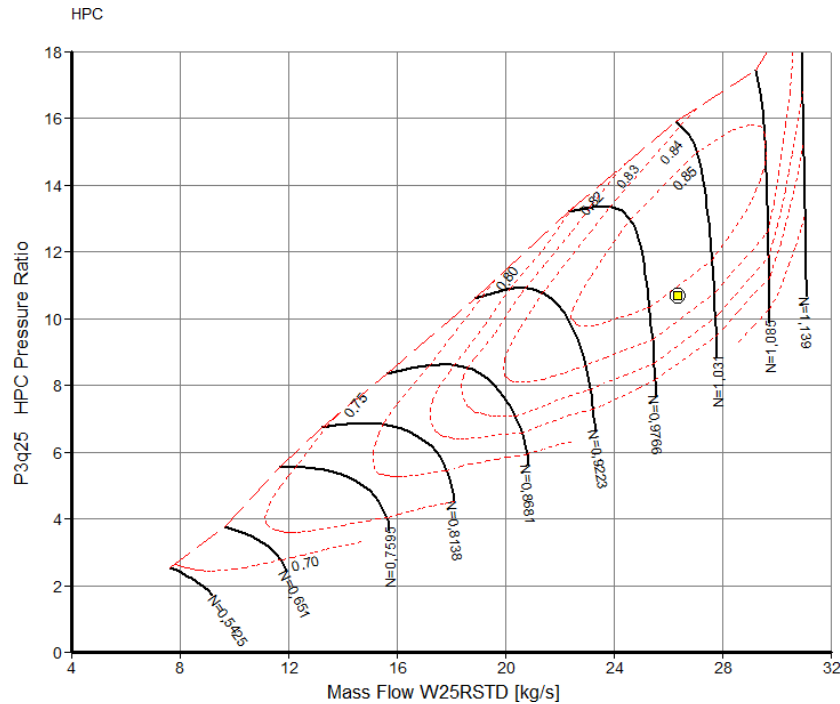


Figura 5.1: Característica de um HPC

Estes mapas são documentos que pertencem aos fabricantes e não são compartilhados com o público. O mapa representado foi retirado do *software Gasturb*. Softwares como o *Gasturb* são considerados pouco precisos por serem de dimensão-zero (0D), ou seja, não contêm informação dos gradientes axiais, radiais e tangenciais, mas ainda assim, conseguem fornecer previsões de *performance* de elevada qualidade para todo o reator.

A análise de simulação disponível no *Gasturb* adequada para este estudo, e já desenvolvida na TAP, é a análise de condições nominais de funcionamento, designada como *Off-Design*. Ou seja, uma análise *Off-Design* irá observar o comportamento de uma turbina a gás de geometria conhecida [18].

Para tal, implica a criação do modelo do ciclo de referência do reator e (*cycle design point*) e que a sua simulação esteja de acordo com os dados conhecidos, obtidos em banco de ensaio. No entanto, este trabalho já estava a ser realizado por outro estudante também no âmbito da sua tese de mestrado. Nesse estudo, foi possível reunir uma amostra de 18 resultados de *performance* de vários reatores. Como estes reatores de correlação foram testados no *rating* CFM56-5B3 (apresenta condições específicas de *thrust*, *bypass ratio* e relação de compressão), apenas reatores que sejam testados nesse rate podem ser analisados pois o modelo não está desenvolvido para outros *ratings*. O *GasTurb* apresenta apenas os parâmetros relativamente às eficiências e aos fluxos nas diferentes estações, porém, também é essencial analisar o EGT e o TSFC (*Thrust Specific Fuel Consumption*). Dito isto, as eficiências, os fluxos, o EGT, o TSFC e incluindo todos os fatores da AnSys são exportados das análises MBTA.

Ao realizar a simulação, é possível verificar a configuração do CFM56-5B existente no *GasTurb*. Na figura 5.2 está ilustrado um reator turbofan como é representado pelo programa *GasTurb*, assim como as suas estações termodinâmicas.

As estações termodinâmicas são locais específicos do reator onde são feitas medições de alguns parâmetros, normalmente, de pressão e temperatura.

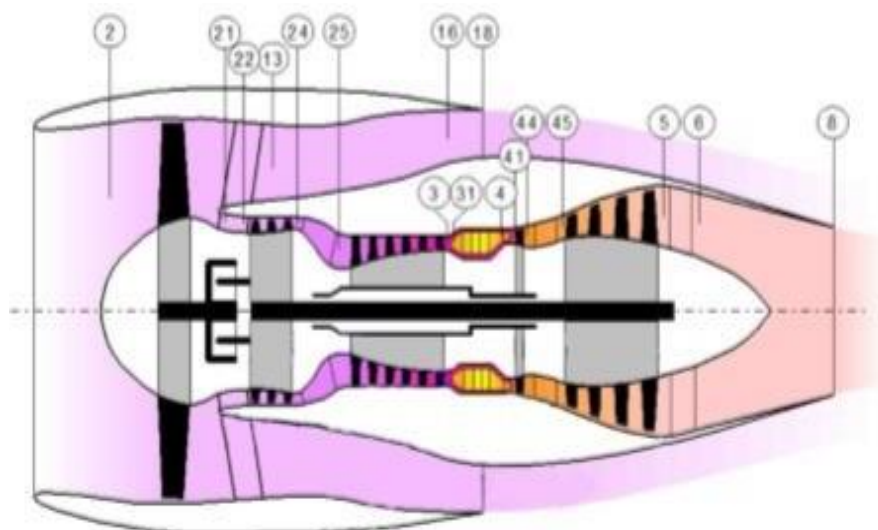


Figura 5.2: Estações termodinâmicas do reator turbofan caracterizadas pelo *GasTurb*

Com base na figura 5.2 é possível verificar as respectivas estações termodinâmicas associadas aos seus componentes. Abaixo estão identificadas as principais estações termodinâmicas do reator CFM56-5B:

- 2 – Secção de entrada do reator
- 22 – Secção imediatamente depois da *Fan* e antes do *Booster*
- 13 – Secção depois da *Fan*, de escoamento do caudal secundário
- 24 – Secção imediatamente depois do *Booster* e antes do HPC
- 25 – Secção depois do *Booster* e à entrada do HPC
- 3 – Secção imediatamente depois do HPC e antes da Câmara de Combustão
- 4 – Secção depois da Câmara de Combustão e antes da HPT
- 41 – Secção depois da Câmara de Combustão e antes da HPT
- 45 – Secção depois da HPT e à entrada da LPT
- 5 – Secção depois da LPT
- 8 – Secção de escape

Para recorrer às funcionalidades do *GasTurb* é necessário ter um modelo de reator base de análise MBTA (*Model Based Test Analysis*). Este trabalho já estava a ser realizado por outro estudante também no âmbito da sua tese de mestrado. Nesse estudo, foi possível reunir uma amostra de 18 resultados de *performance* de vários reatores. Como estes reatores de correlação foram testados no rate CFM56-5B3, apenas reatores que sejam testados nesse rate podem ser analisados pois o modelo não está desenvolvido para outros rates. O *GasTurb* apresenta apenas os parâmetros relativamente às eficiências e aos fluxos nas diferentes estações, porém, também é essencial analisar o EGT e o TSFC (*Thrust Specific Fuel Consumption*). Dito isto, as eficiências, os fluxos, o EGT, o TSFC e incluindo todos os fatores da AnSys são exportados das análises MBTA.

Na figura abaixo, figura 5.3, está representada uma imagem que é apresentada pelo *software* após a análise do reator.

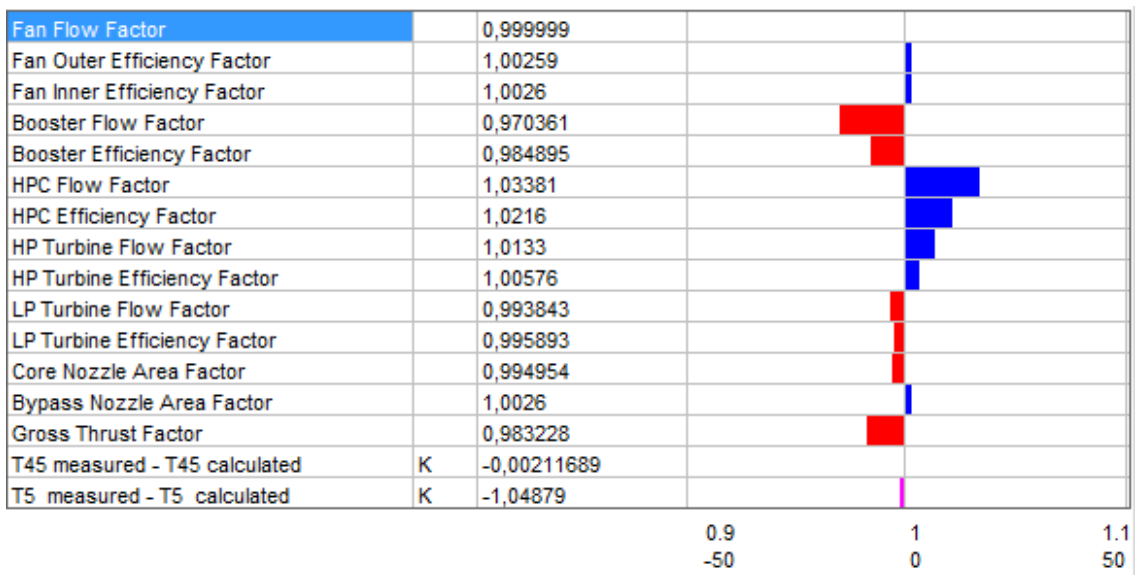


Figura 5.3: Exemplo de um dos reatores analisados

Na figura 5.3, é possível verificar que, por exemplo, o *HPC Flow Factor* e o *HPC Efficiency Factor*, a *HPT Flow Factor* e *HPT Efficiency Factor* apresentam resultados superiores à média utilizada no modelo. Portanto, o compressor de alta pressão e a turbina de alta pressão desse reator apresentam boas condições. Por outro lado, o *Booster Flow Factor* e o *Efficiency Factor*, *LPT Flow Factor* e o *Efficiency Factor* apresentam resultados inferiores à média. O que nos leva a concluir que se o reator não passar nos testes realizados no Banco de Ensaios ou se, por exemplo, não atingir o valor de EGT pretendido, provavelmente, este reator deverá passar outra vez pela oficina da TAP, realizando uma nova manutenção, e de acordo com esta análise os componentes que se encontram abaixo da média da eficiência considerada no estudo (por

exemplo, na imagem acima os valores a vermelho estão abaixo da média aceitável definida pelo *GasTurb* com base nos dados utilizados para a criação do modelo) deverão ser submetidos às alterações necessárias. Neste caso, os componentes que deverão ser analisados e melhorados, recorrendo à uma nova manutenção, são o *Booster* ou a turbina de baixa pressão.

Para facilitar o tratamento e processamento dos dados provenientes da análise feita no *GasTurb*, recorreu-se a um banco de dados utilizando macros VBA do Excel, que já tinha sido desenvolvido por outro aluno na TAP. Na figura 5.4, está representado uma parte da folha do Excel onde é feito esse tratamento de dados. Esses resultados são provenientes da análise de um único reator.

| | Efficiency | Eff. AnSyn Factor | Eff. Delta Percentage (%) | Average Eff. Delta Percentage (%) | Eff. [Above / Below Average] | Flow Factor |
|------------------------------|------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|
| Fan Outer | 0,86133 | ➡ 1,00020 | 0,020% | 0,117% | ➡ -0,097% | ➡ 1,00000 |
| Fan Inner | 0,86136 | ➡ 1,00023 | 0,023% | 0,112% | ➡ -0,089% | |
| Booster | 0,85974 | ⬇ 0,97781 | -2,219% | 0,478% | ⬇ -2,698% | ⬇ 0,97722 |
| HPC | 0,87302 | ⬆ 1,03372 | 3,372% | -0,980% | ⬆ 4,352% | ⬆ 1,04302 |
| HPT | 0,91603 | 🔍 1,00704 | 0,704% | 0,906% | 🔍 -0,203% | ⬆ 1,01500 |
| LPT | 0,70272 | ⬇ 0,79752 | -20,248% | -0,957% | ⬇ -19,291% | ⬇ 0,98491 |
| | | | | | Average EGT HD | |
| EGT HD (K) | 1165,45 | | | | 1178,83 | |
| EGT HD Margin (K) | 44,70 | | | | 31,32 | ⬆ 13,38 |
| EGT HD Margin Difference (K) | 20,09 | | | | 6,71 | |
| | | | | | Average TSFC (g/(N*s)) | |
| TSFC (g/(N*s)) | 11,0417 | | | | 11,116 | 🔍 -0,672% |

Figura 5.4: Exemplo do MBTA de um reator

5.2 Caso de Estudo

Os clientes definem com a TAP, os valores de EGT que pretendem obter após a manutenção realizada. O reator 1 é um caso que apresentou valor de EGT muito abaixo do pretendido, contudo, o seu HPC estava boas condições. Por estas condições é um caso de estudo interessante. Para desenvolvê-lo, e de modo a comparar resultados, recorreu-se a outro reator do mesmo cliente, reator 2, em que o HPC apresentava boas condições, porém não tão boas quando comparadas com o reator 1 e, no entanto, o seu EGT foi mais elevado.

As pás de ambos foram medidas e registadas e em adição também foram instalados, em ambos, os sensores P3 e PT25 que registam a pressão à entrada e à saída, respetivamente, do compressor de alta pressão.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 estão os valores de corda medidos para os dois reatores. Comparando com os valores da tabela 5.3, que representa os valores de corda do manual do CFM56-5B, é possível concluir que os valores de corda dos dois reatores estão acima do valor limite de corda do manual, principalmente o reator 1. No reator 2 o valor é ligeiramente mais baixo no quinto

andar, que já foi dito que é um andar suscetível a falhas.

Tabela 5.1: Média e somatório das cordas de todos os andares do reator 1

Engine 1

| | Stg 1 | Stg 2 | Stg 3 | Stg 4 | Stg 5 | Stg 6 | Stg 7 | Stg 8 | Stg 9 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Average (in) | 2,368 | 1,649 | 1,298 | 1,043 | 0,878 | 0,779 | 0,764 | 0,811 | 0,837 |
| Sum (in) | 89,985 | 87,411 | 77,857 | 70,922 | 65,857 | 63,882 | 62,637 | 64,855 | 63,633 |

Tabela 5.2: Média e somatório das cordas de todos os andares do reator 2

Engine 2

| | Stg 1 | Stg 2 | Stg 3 | Stg 4 | Stg 5 | Stg 6 | Stg 7 | Stg 8 | Stg 9 |
|--------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Average (in) | 2,362 | 1,638 | 1,289 | 1,033 | 0,868 | 0,770 | 0,762 | 0,812 | 0,836 |
| Sum (in) | 89,753 | 86,81 | 77,343 | 70,249 | 65,086 | 63,141 | 62,52 | 65,74 | 63,525 |

Tabela 5.3: Valores de corda mínimos definidos pelo manual e os novos obtidos pelas medições, assim como os somatórios de cada um

| | Mínimo (in) | Pás Novas (in) | Nº de pás |
|-------|-------------|----------------|-----------|
| Stg 1 | 2,277 | 2,375 | 38 |
| Stg 2 | 1,617 | 1,658 | 53 |
| Stg 3 | 1,267 | 1,312 | 60 |
| Stg 4 | 1,021 | 1,080 | 68 |
| Stg 5 | 0,871 | 0,905 | 75 |
| Stg 6 | 0,765 | 0,798 | 82 |
| Stg 7 | 0,757 | 0,774 | 82 |
| Stg 8 | 0,800 | 0,816 | 80 |
| Stg 9 | 0,820 | 0,863 | 76 |

Recorrendo ao *Gasturb* foi feita análise dos dois reatores. Depois os resultados apresentados pelo *Gasturb* foram transferidos para o modelo em Excel para facilitar a análise, como representado nas figuras 5.4 e 5.5 para os reatores 1 e 2, respetivamente. É possível observar que o compressor de alta pressão do reator 1 apresenta uma eficiência de 0,86385. Este resultado significa que, apesar da margem de EGT ser mais baixa que o desejável, é evidente que a eficiência do compressor de alta pressão não é responsável por esse resultado.

No caso do reator 2 é possível observar que a eficiência do compressor de alta pressão é 0,85202. As cordas das pás não são melhores em relação ao reator 1 e nesta análise confirma-se que quanto melhor a dimensão das pás do HPC melhor será a sua eficiência. Verifica-se que, ainda que por uma diferença pequena, que a eficiência do reator 1 é melhor.

| | Efficiency | Eff. AnSyn Factor | Eff. Delta Percentage (%) | Average Eff. Delta Percentage (%) | Eff. [Above / Below Average] | Flow Factor |
|------------------------------|------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|
| Fan Outer | 0,86268 | 👉 1,00259 | 0,259% | 0,117% | 👉 0,142% | ➡ 1,00000 |
| Fan Inner | 0,86268 | 👉 1,00260 | 0,260% | 0,112% | 👉 0,147% | |
| Booster | 0,86723 | 👇 0,98490 | -1,510% | 0,478% | 👇 -1,989% | 👇 0,97036 |
| HPC | 0,86385 | 👈 1,02160 | 2,160% | -0,980% | 👈 3,140% | 👈 1,03381 |
| HPT | 0,91440 | 👉 1,00576 | 0,576% | 0,906% | 👉 -0,330% | 👈 1,01330 |
| LPT | 0,88426 | 👉 0,99589 | -0,411% | -0,957% | 👉 0,546% | 👉 0,99384 |
| | | | | | Average EGT HD | ➡ 4,68 |
| EGT HD (K) | 1174,15 | | | | 1178,83 | |
| EGT HD Margin (K) | 36,00 | | | | 31,32 | |
| EGT HD Margin Difference (K) | 11,39 | | | | 6,71 | |
| | | | | | Average TSFC (g/(N*s)) | |
| TSFC (g/(N*s)) | 11,0813 | | | | 11,116 | 👉 -0,316% |

Figura 5.5: Resultado da análise do reator 1 recorrendo ao *Gasturb*

| | Efficiency | Eff. AnSyn Factor | Eff. Delta Percentage (%) | Average Eff. Delta Percentage (%) | Eff. [Above / Below Average] | Flow Factor |
|------------------------------|------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|
| Fan Outer | 0,86219 | 👉 1,00152 | 0,152% | 0,117% | 👉 0,035% | ➡ 0,99999 |
| Fan Inner | 0,86213 | 👉 1,00145 | 0,145% | 0,112% | 👉 0,033% | |
| Booster | 0,88013 | 👉 0,99577 | -0,423% | 0,478% | 👇 -0,901% | 👇 0,98781 |
| HPC | 0,85202 | 👉 1,00760 | 0,760% | -0,980% | 👈 1,740% | 👈 1,02352 |
| HPT | 0,91424 | 👉 1,00567 | 0,567% | 0,906% | 👉 -0,339% | 👈 1,02004 |
| LPT | 0,84643 | 👇 0,94931 | -5,069% | -0,957% | 👇 -4,112% | ➡ 1,00020 |
| | | | | | Average EGT HD | 👉 -2,52 |
| EGT HD (K) | 1181,35 | | | | 1178,83 | |
| EGT HD Margin (K) | 28,80 | | | | 31,32 | |
| EGT HD Margin Difference (K) | 4,19 | | | | 6,71 | |
| | | | | | Average TSFC (g/(N*s)) | |
| TSFC (g/(N*s)) | 11,1982 | | | | 11,116 | 👉 0,735% |

Figura 5.6: Resultado da análise do reator 2 recorrendo ao *Gasturb*

Portanto, conclui-se que os dois compressores de alta pressão apresentam uma boa eficiência. Para o reator 1 apresentar uma *performance* mais baixa que o desejável, outro componente do reator pode estar com uma eficiência mais baixa, como por exemplo a turbina de baixa pressão, com uma eficiência de 0,88426.

Para além da eficiência, outro parâmetro que deve ser observado é o caudal registado para cada reator, como representado na tabela 5.4

| | Flow factor HPC | Flow factor HPT | Flow factor LPT |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Engine 1 | ➡ 1,02357 | 👈 1,04261 | 👇 0,98714 |
| Engine 2 | ➡ 1,02352 | ➡ 1,02004 | 👇 1,0002 |

Tabela 5.4: Resultado do caudal para os dois reatores em relação à média da base de dados

Estes resultados correspondem às conclusões feitas anteriormente: a eficiência da turbina de baixa pressão é mais baixa do desejável.

Mas não é possível concluir mais pois não existem os sensores T54 e PT54, logo não existem esses dados para acrescentar a este estudo. Por outro lado, para obter o resultado da eficiência da LPT (*Low Pressure Turbine*) recorre-se a uma base de dados de vários reatores analisados anteriormente que estima os valores para T54 e PT54, de acordo com o valor de rotação do reator N1. Como todos os reatores são submetidos à mesma estimativa ou erro, o resultado é credível, mas não é possível obter mais informações sobre a LPT ou HPT pois não é possível isolá-las termodinamicamente.

Para complementar este estudo e obter novos resultados, é importante relacionar a *performance* do compressor de alta pressão com a velocidade de rotação N2. Nesta análise, incluiu-se todos os reatores do mesmo cliente, que foram efetuadas as medições das cordas e que foram, posteriormente, analisados com o *Gasturb*.

Para esta análise, é importante retirar dos resultados obtidos no Banco de Ensaio a velocidade de rotação corrigida N2, o valor da temperatura do ar à entrada do HPC T3, o valor da temperatura do ar à saída do HPC T25, assim como os valores de pressão do ar à entrada e à saída do HPC, Ps3 e PT25, respetivamente, para cada reator e em regime de *Take Off*. Também é retirado os mesmos dados para este o regime *Maximus Continous*.

Um dos valores obtidos é o Ps3 (a pressão estática na estação 3), ou seja, é necessário calcular o valor da pressão total na estação 3. De acordo com um estudo realizado por Kurzke, conclui-se que uma boa aproximação para P3 é dado por: $P3 = Ps3/0,97$.

As pressões lidas nos ficheiros do Banco de Ensaio são em psi e as temperaturas em °C, que devem ser convertidos em K (1 °C=273,15 K). Com estes dados, é possível calcular o rendimento para reator, recorrendo à fórmula do rendimento isentrópico, indicada na referência [18]:

$$\eta_{is.C} = \frac{T_{25}}{T_3 - T_{25}} * \left[(PT3/PT25)^{\frac{\delta-1}{\delta}} - 1 \right] \quad (1.1)$$

Em que o coeficiente de Poisson é $\delta = 1,4$. De acordo com o Relório escrito pelo Eng. António Miguel Henriques [18] o valor adequado para o coeficiente de Poisson a ser utilizado neste estudo é 1,4.

Também é fundamental retirar dos ficheiros dos ensaios os valores da temperatura ambiente do dia do ensaio de cada reator assim como a pressão ambiente desse dia. Com esses valores é possível fazer as correções necessárias para os valores de T3, T25, Ps3, PT25 e consequentemente, para o valor do rendimento obtido.

Como as condições ambientais alteram de dia para dia, é essencial fazer as correções de pressão e temperatura para as condições atmosféricas do dia padrão (DP), deste modo, é possível ter uma base de correlação para os diferentes reatores analisados. Em função do DP a temperatura é $T_{ambiente\ DP} = 288,15\ K$ e a pressão ambiente é $P_{ambiente\ DP} = 14,696\ Psi$. Sendo assim, é feita a adimensionalização em função do dia padrão para a pressão e para a temperatura, respectivamente, as equações estão na referência [18]:

$$P_{corrigida} := P_{lida} * \frac{P_{amb.DP}}{P_{amb.ensaio}} \quad (1.2)$$

$$T_{corrigida} := T_{lida} * \sqrt{\frac{T_{amb.DP}}{T_{amb.ensaio}}} \quad (1.3)$$

Com os cálculos feitos para as correções necessárias para cada reator, esses resultados são guardados como exemplificado na tabela 5.5. Assim é possível fazer um gráfico para verificarmos a influência da velocidade de rotação N2 no rendimento do compressor de alta pressão.

Tabela 5.5: Tabela dos parâmetros lidos e as respectivas adimensionalização em relação à pressão e temperatura do reator 1

| Reator 1 | Max. Cont. | Adimensional | Take Off | Adimensional |
|------------------|------------|--------------|-----------|--------------|
| T _{amb} | 28,600 | | 28,200 | |
| P _{amb} | 14,600 | | 14,600 | |
| N2 | 14495,300 | | 14683,500 | |
| T25 | 143,170 | 133,680 | 158,750 | 149,185 |
| T3 | 560,184 | 541,188 | 584,665 | 565,667 |
| P25 | 39,528 | 39,799 | 44,134 | 44,436 |
| PS3 | 424,200 | 427,105 | 470,300 | 473,521 |
| Rendimento | 0,986 | 0,986 | 0,997 | 0,997 |

É fundamental incluir nesta análise o impacto que a velocidade de rotação N2 apresenta na *performance* do compressor de alta pressão pois, sabe-se que a velocidade de rotação N2 refere-se ao sistema de alta pressão, ou seja, o conjunto do compressor e turbina de alta pressão. Assim sendo, esta velocidade interfere na quantidade de ar que é admitida no compressor de alta pressão e, conseqüentemente, na sua *performance*.

Nesta fase do estudo e com o intuito de ter mais dados de comparação para o reator em estudo, o reator 1, incluiu-se todos os reatores que foram registados os valores de corda e que foram fornecidas informações suficientes para realizar os cálculos referentes a adimensionalização. Ou seja, para além dos 2 reatores analisados até agora, acrescentou-se mais

3, com o objetivo de obter mais respostas. Quanto maior o número de reatores disponíveis para realizar a comparação dos resultados, melhor

Porém, ao longo do desenvolvimento desta tese, surgiram imprevistos e dificuldades, como por exemplo, a impossibilidade de instalar o sensor PT25 em alguns reatores por correr risco de danificar o reator. O número de reatores medidos e que foi possível contornar esta situação reduziu o número total de reatores para 7. Dos 7 motores, 2 reatores não apresentavam, nos ficheiros fornecidos pelo Banco de Ensaio, os valores de T3, ou seja, o valor da temperatura do ar à saída do compressor de alta pressão.

Perante esta situação, foi feita uma iteração para estes 2 reatores, recorrendo aos valores de T3 e N2 existentes dos outros 5 reatores, traçando uma reta linear entre estes pontos. Como a velocidade de rotação N2 é conhecida para os 2 reatores, é possível obter a partir da função da reta linear obtida os valores de T3 para *Take Off* e para *Maximum Continuous*. Os gráficos obtidos para a iteração do T3 em *Take Off* e *Maximum Continuous* estão representados nas figuras 5.7 e 5.8, respetivamente.

Tabela 5.6: Valores da velocidade de rotação, N2, e da temperatura, T3, em regime *Take-Off* para os 5 reatores

| Take Off | N2 [rpm] | 14681,300 | 14726,600 | 14651,400 | 14683,900 | 14708,100 |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | T3 [°C] | 591,530 | 585,984 | 577,004 | 583,046 | 586,536 |

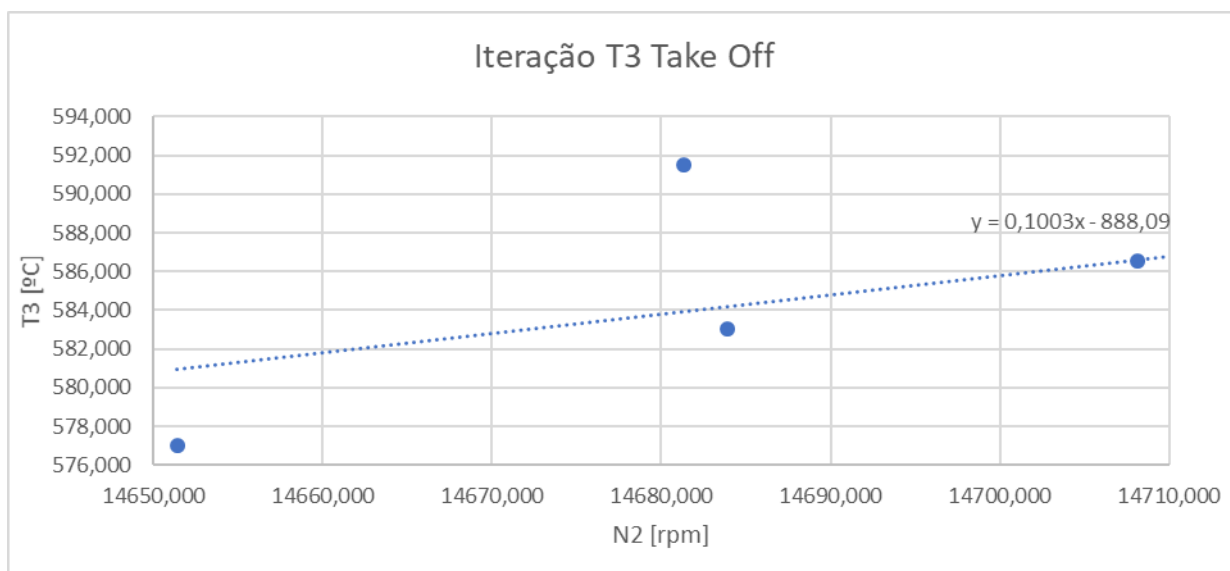
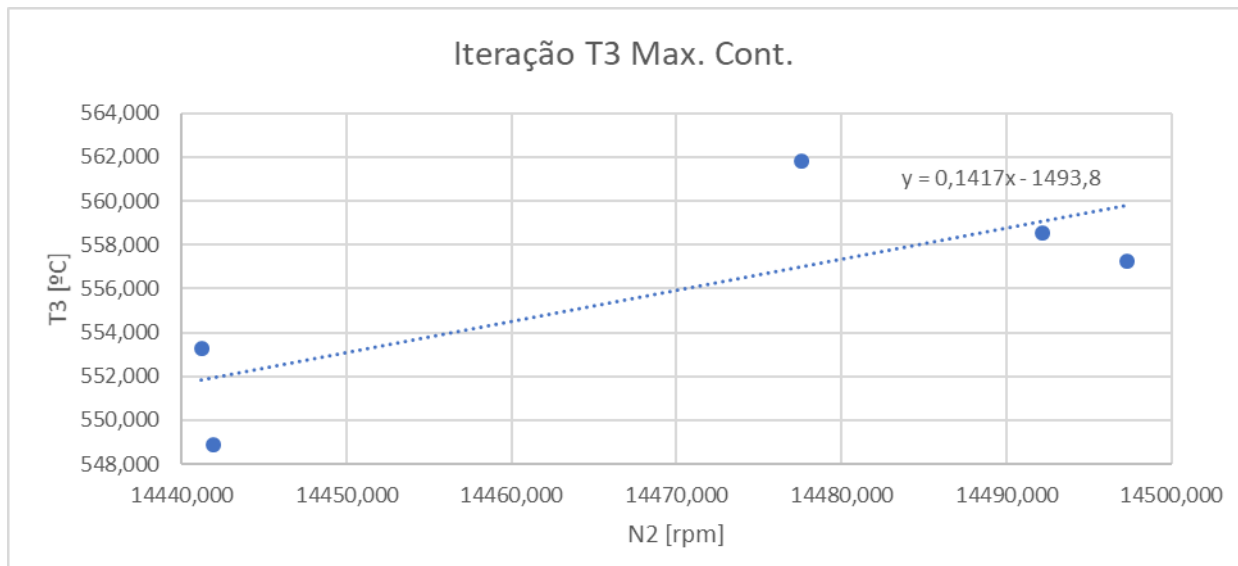


Figura 5.7: Iteração de T3 em regime *Take Off*

Tabela 5.7: Valores da velocidade de rotação, N2, e da temperatura, T3, em regime Máximo Contínuo para os 5 reatores

| Max. Cont. | N2 [rpm] | 14477,600 | 14497,300 | 14441,900 | 14441,200 | 14492,200 |
|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | T3 [°C] | 561,787 | 557,262 | 548,883 | 553,287 | 558,538 |

Figura 5.8: Iteração de T3 em regime *Maximum Continuous*

Então realizando todos os cálculos necessários e as suas respectivas adimensionalizações para cada reator é possível verificar o gráfico resultante da análise do rendimento do HPC com N2, como indicado na figura 5.9.

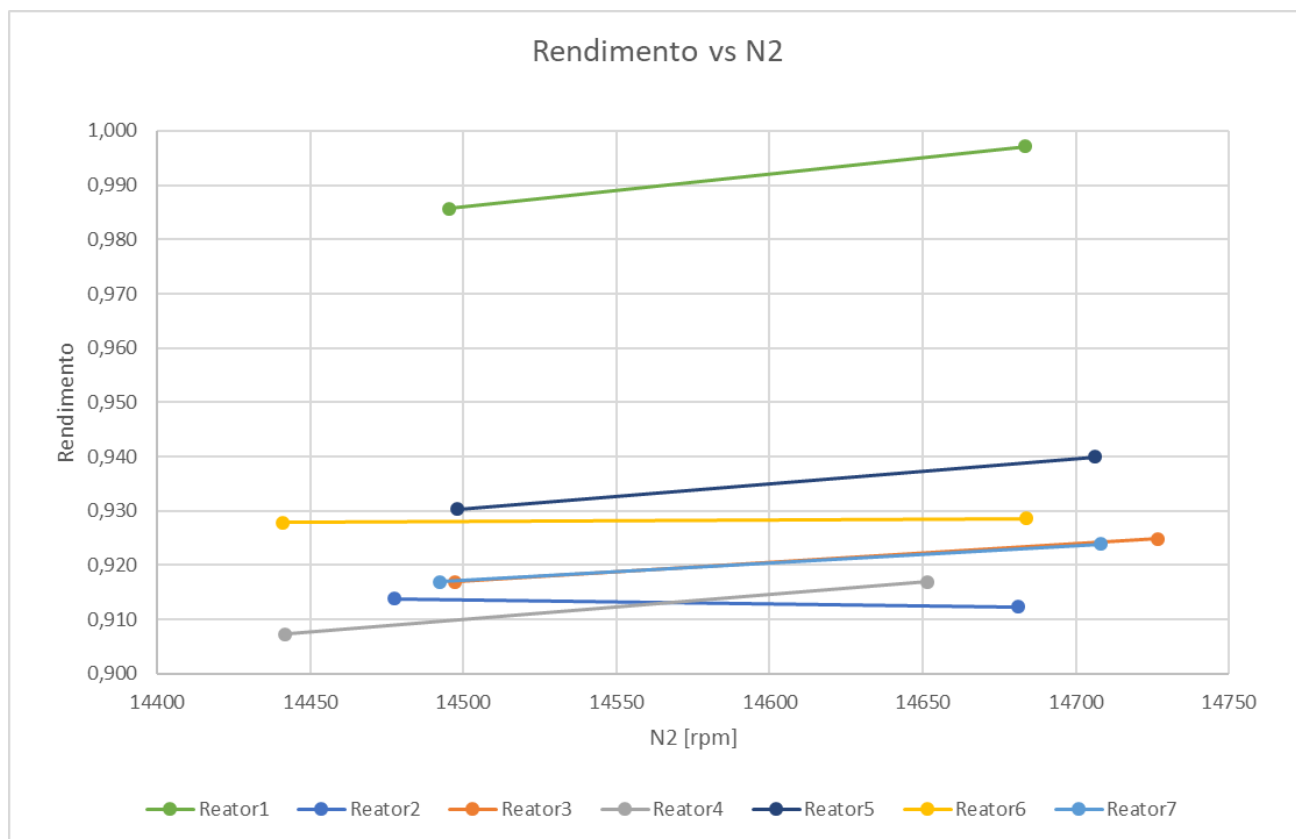


Figura 5.9: Influência do N2 no rendimento do HPC nos regimes *Maximum Continuous* e *Take Off*

Na figura 5.9, os valores de rotação mais baixas correspondem ao regime *Maximum Continuous* e os mais elevados ao regime *Take Off*.

O resultado obtido na figura 5.9, é contraditório com o que se apresenta, pois quando a velocidade de rotação N2 é mais alta significa que a HPT desenvolve mais potência que o HPC. Assim, o HPC tem um rendimento mais baixo quando o N2 aumenta. Dito isto, o rendimento do reator 1 (assinalado a verde na figura anterior) deveria ser mais baixo em *Take Off*, assim como a maioria dos reatores presentes na figura. No entanto, o resultado do reator 2 corresponde ao resultado esperado, ou seja, nesta situação o seu HPC apresenta boas condições de funcionamento.

O sensor PT25 instalado nos reatores, apesar de ser compatível não pertence aos reatores em estudo. Consequentemente, não pertence às peças nem aos componentes dos mesmos, sendo apenas instalado para o presente estudo. Adicionalmente a esta situação, a deficiente instalação do sensor PT25, pode provocar o resultado contraditório apresentado na figura 5.9. O acesso da zona do reator onde o sensor PT25 deve ser instalado é de difícil acesso, assim sendo, o processo de instalação requer muita atenção para não danificar nenhum componente do reator e também não provocar uma fuga residual de pressão resulta nas leituras de valores de pressão mais baixos do que os desejáveis. É provável que esta situação seja a origem do resultado contraditório obtido na figura 5.9.

6 Novo Critério de Aceitação

Com os valores da corda de cada andar do HPC e com os resultados de *performance* destes reatores que foram medidos o valor de corda foi possível determinar quais deveriam ser os valores de corda para cada andar do HPC de forma a garantir a melhor *performance* possível dos reatores CFM56-5B.

Para definir a distribuição de percentagem de corda de forma mais correta e que corresponda, de facto, à realidade é essencial conhecer quais são os andares que tem maior influência no desempenho final do HPC.

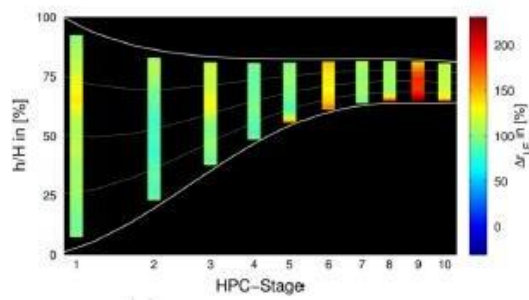
6.1 Impacto de cada andar na performance do HPC

J. Marx, J.Stading, G.Reitz e J.Friedrichs [19] conduziram uma análise estatística com 2 sets completos de HPC fora de serviço. Estes 2 reatores tinham aproximadamente 5,000 e 3,200 ciclos desde a última visita à oficina.

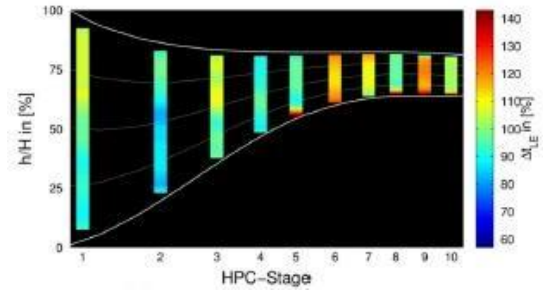
A composição de cada andar de pás foi arbitrária (uma mistura entre pás reparadas e novas), o que é comum para reatores que já realizaram, pelo menos, uma visita à oficina. Mais de 1,400 pás reparadas e 300 novas foram digitalizadas para verificar as variações de fabricação.

Na figura 6.1, são ilustradas as variações de todos os parâmetros analisados para todos os andares (média das variações de todas as pás de cada andar) com a altura relativa do canal das pás do HPC, h/H , sendo que h representa a altura da pá e H a altura do canal do HPC.

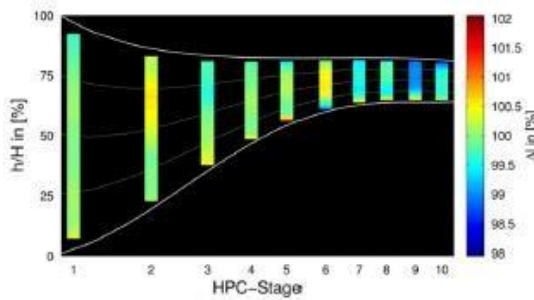
Um valor acima ou abaixo de 100% indica que aquela propriedade é acima ou abaixo da geometria de pás em estado novo e igual a 100% indica que é igual a uma pá em estado novo.



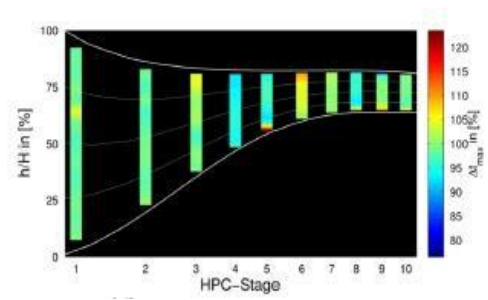
(a) Radius of Leading Edges



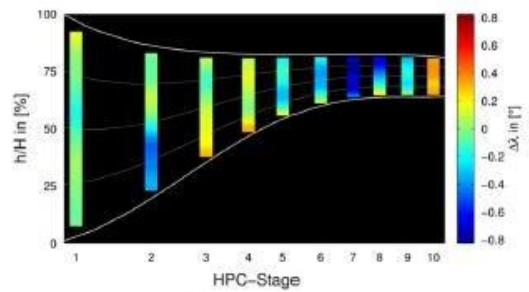
(b) Thickness of Leading Edges



(c) Chord Length



(d) Maximum Profile Thickness



(e) Stagger Angle

Figura 6.1: Deterioração do HPC [19]

Relativamente ao raio do bordo de ataque e da sua espessura (imagens 6.1(a) e 6.1(d)), é possível observar que apesar de mais distintas nos últimos andares, foram verificadas variações significantes nos primeiros andares.

No estudo realizado por Hai-junKou, Jian-shengLin, Jun-hongZhang e XiFu [2] a *performance* dinâmica e a fadiga das pás do HPC foram verificadas através de uma análise numérica e através de testes para identificar a causa específica da falha e por último, prevenir a falha da pá.

Foi desenvolvido um modelo do HPC baseado em Engenharia Reversa e foi investigado as características dinâmicas da pá durante interações do comportamento aerodinâmico e estrutural sob várias condições de voo. Um campo de fluxo foi construído para simular carregamentos aerodinâmicos que causam vibrações das pás.

As características e a razão de pressão no HPC são relacionadas com a geometria e o tamanho das pás. Nestes estudos, os autores assumiram um perfil de uma pá do HPC com uma forma 3D livre: uma pequena alteração na sua forma origina uma grande alteração no fluxo do HPC. Esta alteração na performance aerodinâmica do HPC pode resultar em diferentes comportamentos das vibrações e fadiga.

Muitas falhas ocorreram no HPC de um reator turbofan devido a fratura das pás do 5º andar. É comum ocorrer fratura por fadiga, que normalmente ocorre na borda de ataque ou de fuga próximo da raiz da pá (figura 6.2(a)). Em cada falha, a pá soltou-se do rotor enquanto o reator estava em funcionamento e causou vários danos no reator e perda de energia (figura 6.2(b)).



(a) Zona comuns de falha por fadiga

(b) Pás do HPC danificadas

Figura 6.2: Zona comuns de falha por fadiga e pás do HPC danificadas [2]

Estes estudos demonstram que os três primeiros andares do HPC têm maior influência no seu desempenho final.

Também é possível verificar que as pás do quinto andar são mais suscetíveis a fratura por fadiga, é uma característica a ter em atenção pois coloca em risco não só a *performance* do HPC como o seu funcionamento normal.

6.2 Distribuição e Percentagem de Corda do HPC

Para cada andar do HPC é distribuído um valor de percentagem tendo em conta o peso de cada um na sua *performance*. Como os três primeiros andares e o quinto andar apresentam uma maior influência na *performance* do HPC estão uma percentagem mais alta em relação aos outros andares.

A distribuição é baseada nos resultados dos estudos realizados, na experiência e sensibilidade adquiridas pelos engenheiros e técnico em relação ao funcionamento do HPC e dos seus componentes, nomeadamente as pás de cada andar.

Sabe-se que os três primeiros andares do HPC são os mais importantes devido as suas maiores dimensões, ou seja, comprimem uma maior quantidade de ar e porque são feitas de um material que não pode ser reparado por soldadura, ligas de titânio. E de acordo com o estudo realizado por Hai-junKou, Jian-shengLin, Jun-hongZhang e XiFu [19] o quinto andar também em impacto na *performance* final pois tem tendência para sofrer fraturas.

Assim sendo a ponderação do impacto que cada andar tem na *performance* final do reator para cada andar foi feita com base nestes estudos e com os conhecimentos adquiridos pelos engenheiros com a experiência. Na tabela 6.1 estão os somatórios de corda, em polegadas (in), para cada andar de cada um dos reatores.

| | 1º Andar | 2º Andar | 3º Andar | 4º Andar | 5º Andar | 6º Andar | 7º Andar | 8º Andar | 9º Andar |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Reator 1 (in) | 89,985 | 87,411 | 77,857 | 70,922 | 65,857 | 63,882 | 62,637 | 64,855 | 63,633 |
| Reator 2 (in) | 89,753 | 86,81 | 77,343 | 70,249 | 65,086 | 63,141 | 62,520 | 65,740 | 63,525 |
| Reator 3 (in) | 89,660 | 86,444 | 76,380 | 70,368 | 64,885 | 63,664 | 62,449 | 65,462 | 64,315 |
| Reator 4 (in) | 90,722 | 87,556 | 77,752 | 70,501 | 64,870 | 63,242 | 62,343 | 64,601 | 63,803 |
| Reator 5 (in) | 89,952 | 87,959 | 77,546 | 70,120 | 65,372 | 63,669 | 62,854 | 64,757 | 62,949 |
| Reator 6 (in) | 89,802 | 88,302 | 78,724 | 71,750 | 67,432 | 65,282 | 63,692 | 65,683 | 64,161 |
| Reator 7 (in) | 89,278 | 87,056 | 78,738 | 71,118 | 66,537 | 64,639 | 62,931 | 65,241 | 63,396 |
| Ponderação (%) | 0,250 | 0,150 | 0,150 | 0,100 | 0,150 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 |

Tabela 6.1: Somatório e ponderação de corda de cada andar de cada reator

Com estes valores fez-se o seguinte cálculo para analisar se estes valores estão próximos dos valores de corda para pás novas:

$$\% \text{ Andar } x = \frac{\sum \text{corda andar } x}{\sum \text{cordas novas andar } x} \quad (1.4)$$

Por exemplo, para o andar 1 o somatório dos valores de corda medidos das 38 pás do respetivo andar pertencente ao reator 1 é igual a 89,985 in. Então sabendo que o valor de corda

para uma pá nova é 2,375 in, a percentagem do valor de corda em relação ao valor de corda para uma pá nova é: $\frac{89,985}{38 \times 2,375} \times 100$.

Deste modo, foi armazenado todos os valores de cada andar para cada reator em relação ao valor de corda de uma pá nova, representada na tabela 6.2 abaixo.

| | 1º Andar | 2º Andar | 3º Andar | 4º Andar | 5º Andar | 6º Andar | 7º Andar | 8º Andar | 9º Andar |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Reator 1 (%) | 99,706 | 99,473 | 98,903 | 96,571 | 97,026 | 97,625 | 98,690 | 99,349 | 97,019 |
| Reator 2 (%) | 99,449 | 98,789 | 98,250 | 95,655 | 95,891 | 96,492 | 98,506 | 100,704 | 96,854 |
| Reator 3 (%) | 99,346 | 98,372 | 97,027 | 95,817 | 95,594 | 97,292 | 98,394 | 100,278 | 98,059 |
| Reator 4 (%) | 100,523 | 99,638 | 98,770 | 95,998 | 95,572 | 96,647 | 98,227 | 98,959 | 97,278 |
| Reator 5 (%) | 99,669 | 100,096 | 98,508 | 95,479 | 96,312 | 97,299 | 99,032 | 99,198 | 95,976 |
| Reator 6 (%) | 99,503 | 100,487 | 100,005 | 97,698 | 99,347 | 99,764 | 100,352 | 100,617 | 97,824 |
| Reator 7 (%) | 98,923 | 99,069 | 100,022 | 96,838 | 98,028 | 98,782 | 99,153 | 99,940 | 96,657 |

Tabela 6.2: Percentagem de corda para cada andar em relação ao valor de corda de uma pá nova

Na tabela 6.2 é possível verificar alguns resultados sublinhados a amarelo. Nesses casos, o somatório do valor de corda do respetivo andar é superior ao somatório do valor de corda considerando todas as pás novas. Assim sendo, para fazermos a ponderação final do valor de corda recomendado para cada andar, os valores a amarelo serão descartados e serão considerados os valores mais altos de cada andar tendo em conta todos os reatores em estudo. Por exemplo, entre todos os valores de corda, de todos os reatores apresentados na tabela 6.2 para o primeiro andar, o mais próximo do valor desejado, ou seja, do valor de corda de uma pá nova é o do reator 1. Este raciocínio é feito para os restantes andares, e assim obtém-se um valor de corda em relação ao valor de corda para uma pá nova para todos os andares, assinalados a verde na tabela 6.2.

De modo a verificar e validar esta escolha multiplicou-se a ponderação do impacto de cada andar na eficiência final do compressor de alta pressão pelos valores escolhidos, representados na tabela anterior. Assim é possível verificar que, de facto, o somatório de todos os andares, tendo em conta esta ponderação, é muito próxima de 1, representado na tabela 6.3.

Na tabela 6.3, está também definido o melhor valor de corda para cada andar tendo em conta todos os reatores analisados. Com isto, a distribuição de percentagem de corda de cada andar do HPC que melhor caracteriza as suas influências na *performance* do HPC é apresentada na tabela 6.3 seguinte. Isto significa que cada reator que apresente valores de corda igual ou superior aos aconselhados neste estudo, definido por corda final na tabela 6.3, deve garantir uma boa *performance*.

| | Mínimo (in) Pás Novas (in) | |
|--------------|-----------------------------------|-------|
| Stg 1 | 2,277 | 2,375 |
| Stg 2 | 1,617 | 1,658 |
| Stg 3 | 1,267 | 1,312 |
| Stg 4 | 1,021 | 1,080 |
| Stg 5 | 0,871 | 0,905 |
| Stg 6 | 0,765 | 0,798 |
| Stg 7 | 0,757 | 0,774 |
| Stg 8 | 0,800 | 0,816 |
| Stg 9 | 0,820 | 0,863 |

Tabela 6.3: Resultados para o valor de corda para cada andar

Com o intuito de fazer uma breve comparação entre os valores de corda apresentados na tabela 6.3, encontra-se abaixo a tabela 6.4, onde estão representados os valores de corda para pás novas e os valores de corda mínima definidos pelo manual do fabricante.

| | 1º Andar | 2º Andar | 3º Andar | 4º Andar | 5º Andar | 6º Andar | 7º Andar | 8º Andar | 9º Andar | Total |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Ponderação Andar (%) | 0,250 | 0,150 | 0,150 | 0,100 | 0,150 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 1 |
| Ponderação final (in) | 0,249 | 0,149 | 0,148 | 0,097 | 0,149 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,992 |
| Somatório Final (in) | 89,985 | 87,556 | 77,857 | 71,750 | 67,432 | 65,282 | 62,931 | 65,241 | 64,315 | |
| Corda Final (in) | 2,368 | 1,652 | 1,297 | 1,055 | 0,899 | 0,796 | 0,767 | 0,815 | 0,846 | |

Tabela 6.4: Valores de corda para pás novas e valores mínimos definidos pelo manual do fabricante [3]

7 Conclusões

Neste capítulo final serão apresentados os resultados alcançados, as dificuldades e imprevistos que surgiram durante este estudo. Será feita também uma proposta para trabalhos futuros com base no que se desenvolveu nesta tese.

7.1 Conclusões

O objetivo principal da presente tese baseia-se no desenvolvimento de um novo critério de aceitação de corda que garanta a melhor *performance* do compressor de alta pressão e como consequência do reator. Para atingi-lo, foi necessário passar por vários processos de análise e operações.

É fundamental ter uma boa base de dados de valores de corda de vários reatores CFM56-5B, ou seja, apenas o tipo de reator em estudo. Como este trabalho nunca foi realizado na TAP ME, este processo iniciou-se com o processo de medição e registo das cordas das pás.

As medições foram feitas manualmente e surgiu a necessidade de produzir uma ferramenta de suporte para as pás, de modo que este processo de medições passasse a ser automático, preciso e rápido. Desenvolveu-se uma ferramenta para o 4º andar que suporta de forma segura e fixa todas as pás desse andar (68 pás). Neste processo de medição automática, a ponteira da máquina CMM, existente na TAP ME, toca nos dois lados finais da pá armazenando os valores obtidos.

Recorreu-se ao *software* de análise de *performance GasTurb* para verificar a *performance* de cada componente do reator isoladamente. Assim, com esta ferramenta informática, com conceitos de termodinâmica e com os resultados dos ensaios fornecidos pelo Banco de Ensaios da TAP ME definiu-se um novo critério de aceitação de corda para os motores CFM56-5B que devem garantir uma boa *performance* do reator que é analisada através da margem de EGT. Com este novo critério é possível garantir a boa *performance* do HPC e como consequência do reator e, assim, reduzir os custos associados com a compra de pás novas para o HPC.

Também deveria ser desenvolvido um sensor PT25, sensor que mede a pressão total à entrada do compressor de alta pressão, pois não é fornecido pelo fabricante. Porém foi possível verificar que o sensor PT25 do reator CFM56-3 existente na oficina TAP ME encaixa perfeitamente na estrutura do reator CFM56-5B.

Durante o desenvolvimento deste trabalho houve a oportunidade de analisar um caso de estudo interessante que a TAP deveria apresentar a um cliente internacional, que incluiu a análise realizada na presente tese.

Contudo durante este trabalho surgiram imprevistos, como por exemplo, alterações inesperadas nos prazos de manutenção dos reatores, colocando em causa as medições das cordas das pás desses reatores ou a falta de dados perante a impossibilidade da instalação do sensor PT25 por haver riscos de danificar o reator.

Ainda assim, os objetivos foram alcançados e a ferramenta que suporta as pás para realizar as medições automáticas encontra-se disponível para utilização, na oficina da TAP, e as medições que já foram feitas servirá para futuros estudos a ser realizados na TAP.

7.2 Trabalhos Futuros

Um trabalho essencial a ser realizado é a continuação do projeto da produção da ferramenta para os restantes andares com o intuito de medir as cordas das pás do HPC de forma automática.

Como os valores das dimensões das bases das pás dos vários andares estão disponíveis e armazenados na TAP, o processo de conceção e produção desses mesmos andares torna-se mais simples e rápido.

E é fundamental que o trabalho de medição e armazenamento dos valores das cordas das pás do HPC dos diversos reatores que passam pela oficina da TAP ME seja continuado pois, podem ser utilizados para uma posterior análise, caso o cliente deseje, por exemplo. Assim é possível recorrer a estes dados para verificar as condições do HPC e o seu impacto na *performance* do reator como, de facto, aconteceu durante o desenvolvimento desta tese.

Outro trabalho interessante é realizar uma análise, semelhante a apresentada nesta tese, mas para outras famílias de reatores para além do CFM56-5B, de modo que todos os compressores de alta pressão dos vários tipos de reatores que passam pela oficina da TAP possam ser analisados. Verificando assim a eficiência do HPC e a *performance* do reator, e de acordo com estes resultados é possível reduzir os custos de manutenção.

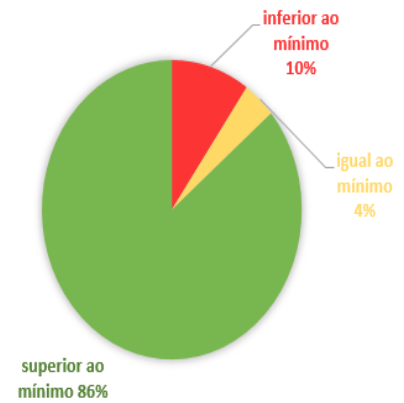
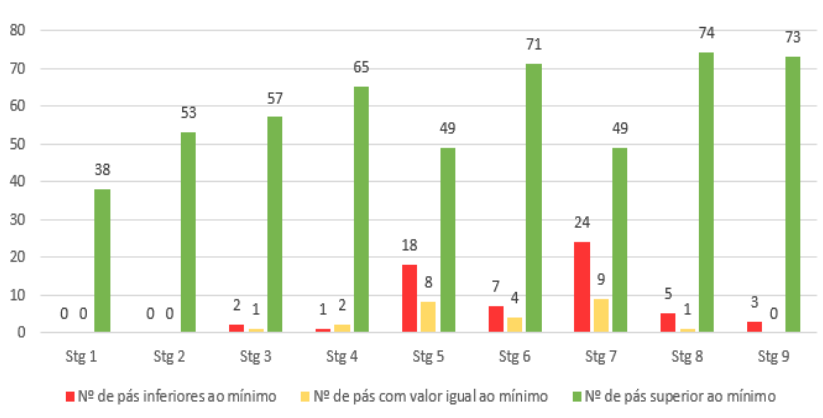
8 Bibliografia

- [1] Air Transport Action Group. Disponível em (2017, Setembro): <http://www.atag.org/facts-and-figures.html>
- [2] Kou, H., Lin, J., Zhang, J., Fu, X. (2016, Maio). *Dynamic and fatigue compressor blade characteristics during fluid-structure interaction: part I—blade modelling and vibration analysis*. Universidade de Taijin, China.
- [3] TAP Portugal (2016). Manual Formação. *Formação Profissional CFM56-3/CFM56-5A/CFM56-5B/CFM56-5C/CFM56-7B, Hardware*.
- [4] Martins, D. A. R. (2015, outubro). *Off-Design Performance Prediction of the CFM56-3 Aircraft Engine*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- [5] ROLLS ROYCE (1996). The jet engine. 5th ed. Derby: Rolls Royce, The Technical Publications Department, 1996.
- [6] *EGT margin by CFM*. Apresentação disponível em (2018, Junho): <http://www.slideshare.net/RicardoCcoyureTito1/05-egt-margin-by-cfm>
- [7] Ackert, S. (2015, Maio). *Engine Maintenance Management*. Disponível em (2018, Junho): http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine_mx_management_madrid_may-12_2015.pdf
- [8] Badamasi M., Nabil I. M., Sadiq. I., Suleiman M. M. (2016, Março). *Impacts of Compressor Fouling On the Performance of Gas Turbine*. Universidade Nacional de Jodhpur, Índia.
- [9] Tong S. K., Kyu S. C. (2009, Junho). *Comparative analysis of the influence of labyrinth seal configuration on leakage behavior*. Universidade Inha, Coreia.
- [10] Ackert, S. (2011, Setembro). *Engine Maintenance Concepts for Financiers*. Disponível em (2018, Junho): http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine_mx_concepts_for_financiers_v2.pdf

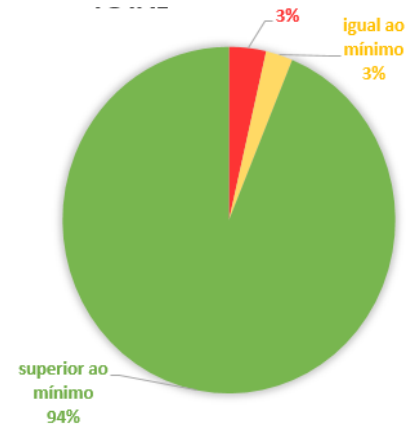
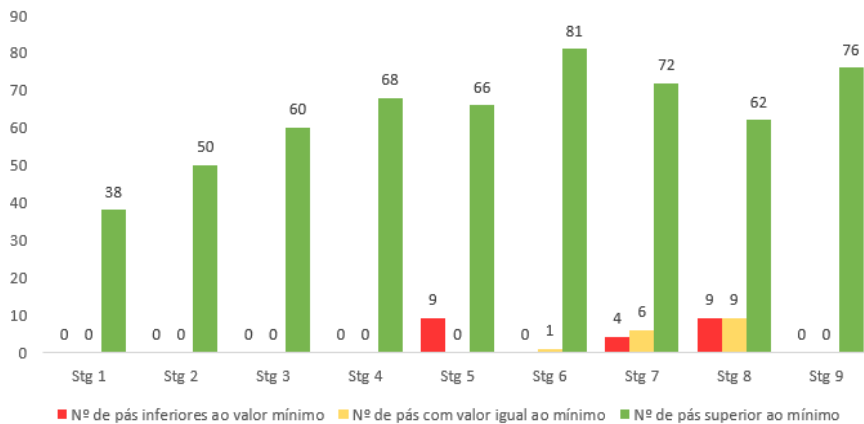
- [11] *Tap Maintenance and Engineering*. Descrição de serviços. Disponível em (2017, Dezembro): <https://www.tap-mro.com/Pages/Our%20Services/Services.aspx>
- [12] Ribeiro, A. M. P. (2012, Novembro). *Análise de Performance da Família de Motores de Avião CFM56*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [13] Pinto, M. (2016, Agosto). Apresentação *CFM56-3 HPC Blade Chord Measurement*. TAP Air Portugal.
- [14] *Mitutoyo - S574 Crysta-Plus CNC CMM*, Catálogo da Mitutoyo. Disponível em (2018, Janeiro): <http://detercoonline.com/products/cmm-equipment/cmm-cnc-coordinate-measuring-machine/mitutoyo-s574-crysta-plus-cnc-cmm-detail>
- [15] *MakerBot 3D Print*. Catálogo. Disponível em (2018, Janeiro): <https://www.makerbot.com/products/3d-printers/>
- [16] *CMM Application*. Catálogo. Disponível em (2018, Janeiro): <http://www.renishaw.com/en/cmm-fixtures--20851>
- [17] Pachidis, V. (2006) - *Advanced gas turbine simulation*. Cranfield: Cranfield University, 2006. Tese de doutoramento, Universidade de Cranfield.
- [18] Henriques, A.M.A (2011, Janeiro). 2º Relatório: *Análise da influência dos procedimentos de manutenção do motor CFM56-3 no seu desempenho em Banco de Ensaio*. TAP Air Portugal.
- [19] Marx, J., Stading, J., Reitz, G., Friedrichs, J. (2013, Setembro). *Investigation and analysis of deterioration in high pressure compressors due to operation*. Congresso Aeroespacial Alemão, Alemanha.

Anexo A – Medições Realizadas

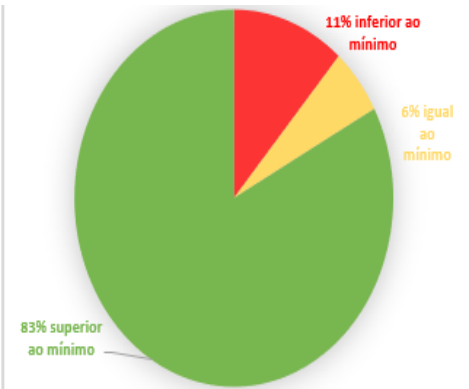
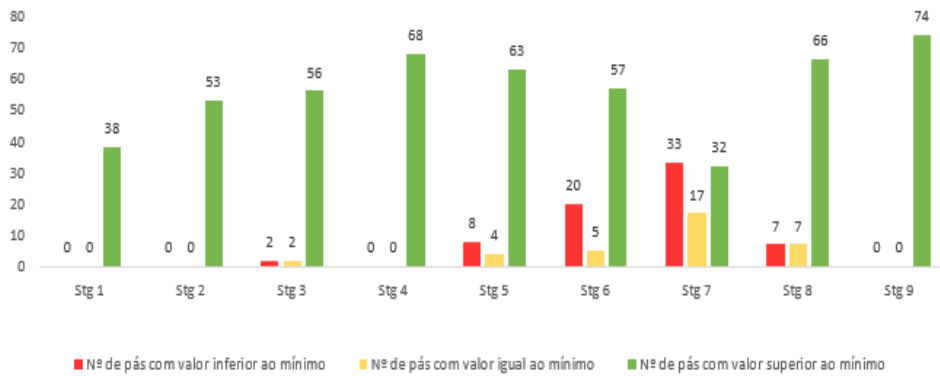
Análise das cordas das pás do HPC do reator X



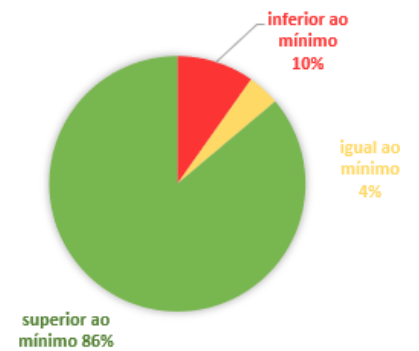
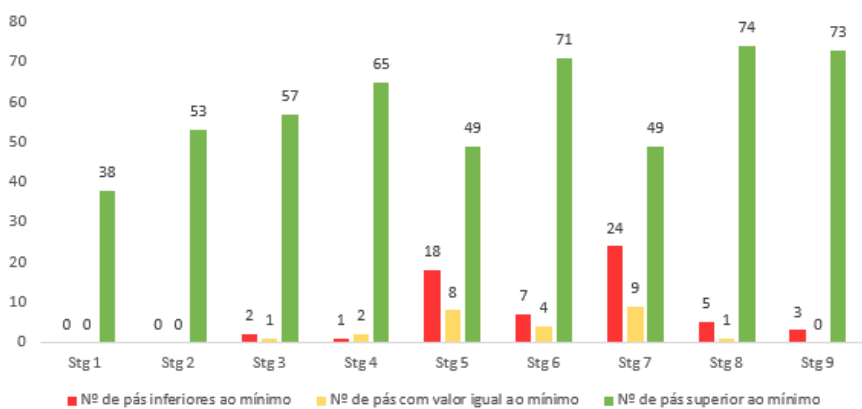
Análise das cordas das pás do HPC do reator Y



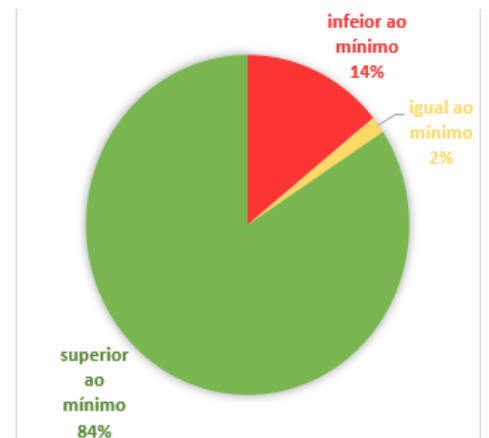
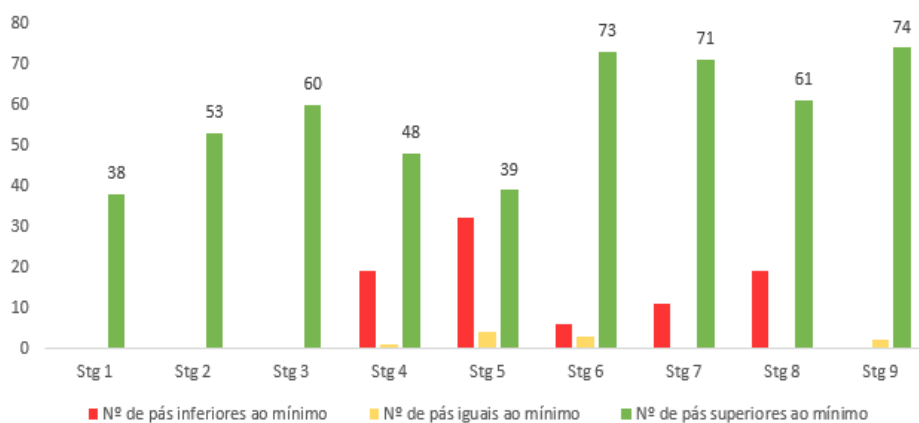
Análise das cordas das pás do HPC do reator W



Análise das cordas das pás do HPC do reator K



Análise das cordas das pás do HPC do reator Z



Análise das cordas das pás do HPC do reator T

